



**Daniel Filipe Correia de Sousa**

Licenciado em Ciências da  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Análise de Risco no Planeamento da Instalação de um  
Parque Eólico *Offshore***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Fernando José Almeida Vieira do Coito, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Coorientador: Alexandra Maria Baptista Ramos Tenera, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: João Almeida das Rosas, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Arguente: Maria Celeste Rodrigues Jacinto, Professora Auxiliar, FCT-UNL

Vogais: Alexandra Maria Baptista Ramos Tenera, Professora Auxiliar, FCT-UNL  
Tiago Mendes Duarte, Engenheiro Especialista, EDP Inovação, S.A.



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2016**



## **Análise de Risco no Planeamento da Instalação de um Parque Eólico *Offshore***

Copyright © Daniel Filipe Correia de Sousa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Ao Avô Joaquim*



## Agradecimentos

Chegado o momento de entregar aquele que é, no fundo, o documento que oficializa a conclusão do meu Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, agradecer a todos aqueles que participaram direta ou indiretamente neste meu percurso torna-se essencial.

Em primeiro lugar, uma palavra de apreço para com a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), instituição que me acolheu nestes últimos anos e que contribuiu ativamente para o meu enriquecimento pessoal e intelectual, dotando-me de competências outrora inexistentes e que agora assumem um papel fundamental na minha forma de ser e de estar.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer à EDP Inovação, empresa do Grupo EDP, que me deu a oportunidade de desenvolver o meu tema de dissertação com base num dos seus maiores projetos da atualidade, o que me permitiu não só aprender um vasto leque de novos conceitos como permitiu também a minha aproximação a um ambiente profissional de excelência.

Em terceiro lugar, gostaria de expressar a minha gratidão para com o professor Fernando Coito pelo facto de me ter recebido como seu orientando, o que me possibilitou abraçar este enorme desafio e assim desenvolver algo que se destaca dos temas gerais da eletrotecnia, e para com a professora Alexandra Tenera, que aceitou ser minha coorientadora e que foi a grande responsável pela disponibilização da ferramenta de simulação necessária à execução deste trabalho.

Em quarto lugar, agradeço à senhora Conceição Rosa, que foi a primeira pessoa com que eu estabeleci contacto dentro da EDP Inovação e que foi a principal interveniente na criação deste vínculo entre o meio académico e o meio empresarial. Ao engenheiro Pedro Valverde um cumprimento especial pelo facto de me ter proposto o tema e por ter estado presente na minha primeira aproximação à empresa. E, finalmente, um bem-haja ao engenheiro Tiago Duarte a quem eu estou muito reconhecido por todo o apoio que me prestou como meu supervisor.

Em quinto e último lugar, mas mais importante que tudo, um profundo obrigado aos meus. Em particular à minha mãe, por tudo aquilo que fez por mim ao longo deste tão importante capítulo da minha vida; ao meu irmão, que sempre me incentivou e sempre se dedicou a mim; à minha avó, por todo o carinho com que sempre me tratou; e à minha namorada, que esteve sempre comigo nos momentos mais difíceis. A todos eles um enorme e eterno obrigado.



## Resumo

---

A presente dissertação foca-se no desenvolvimento de uma metodologia que permita efetuar a modelação, análise e otimização da sequência de montagem, transporte e instalação de um parque eólico *offshore*. As variáveis consideradas incluem a restrição de recursos, a incerteza das condições meteorológicas e a duração das atividades. Este tema surge no âmbito da fase pré-comercial do projeto WindFloat Atlantic (WFA), tendo sido desenvolvido em parceria com a EDP Inovação. O projeto em estudo refere-se à instalação de um parque eólico ao largo da costa da cidade de Viana do Castelo, sendo este constituído por três aerogeradores e pelas respetivas plataformas flutuantes.

De modo a solucionar o problema, procedeu-se à realização de um processo de análise de risco quantitativa tendo por base o método de análise de cenários. Este método visa a possibilidade de reordenar certas atividades do modelo de risco implementado com o objetivo de maximizar o desempenho do projeto. Através da simulação de Monte Carlo determinou-se então um vasto leque de *outputs* para apoio à tomada de decisão, entre os quais o *weather downtime* (WDT), a principal fonte de incerteza estudada.

**Palavras-chave:** WFA; análise de risco; análise de cenários; reordenamento de atividades; WDT; simulação de Monte Carlo.

---



## Abstract

---

This dissertation focuses on the development of a methodology that models, analyzes and optimizes the assembly, transportation and installation of an offshore wind farm. The variables accounted for include the constraints of resources, uncertainty of weather conditions and duration of activities. This topic arises from the pre-commercial stage of the WindFloat Atlantic (WFA) project, which was developed in association with EDP Inovação. The project is related to the installation of a wind farm off the coast of Viana do Castelo, which is composed by three wind turbines and the respective floating platforms.

To solve the problem, a quantitative risk analysis process based on the scenario analysis method was performed. This method aims to reorder certain activities of the implemented risk model in order to maximize the project performance. Through Monte Carlo simulation a wide range of outputs for decision support was determined, such as the weather downtime (WDT), the main source of uncertainty studied.

**Keywords:** WFA; risk analysis; scenario analysis; activities reordering; WDT; Monte Carlo simulation.

---



# Índice de Matérias

<b>1.</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Motivação .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.3.	Contribuição Original .....	3
1.4.	Organização da Dissertação .....	4
<b>2.</b>	<b>Análise de Risco no contexto da Energia Eólica <i>Offshore</i> .....</b>	<b>5</b>
2.1.	Energia Eólica <i>Offshore</i> .....	5
2.1.1.	Panorama Global .....	5
2.1.2.	Tecnologia .....	7
2.1.3.	Projeto WindFloat 1 .....	9
2.2.	Análise de Risco em Projetos .....	12
2.2.1.	Definição .....	12
2.2.2.	Abordagens Metodológicas .....	13
2.2.2.1.	Abordagem Determinística .....	15
2.2.2.2.	Abordagem Estocástica .....	16
2.2.3.	Processo de Execução .....	17
2.2.3.1.	Desenvolvimento do Modelo .....	17
2.2.3.1.1.	Método do Caminho Crítico .....	18
2.2.3.1.2.	Método do Diagrama de Precedência .....	19
2.2.3.1.3.	Técnica de Revisão e Avaliação de Programa .....	20
2.2.3.1.4.	Gestão de Projetos pela Cadeia Crítica .....	21
2.2.3.2.	Identificação das Incertezas .....	23
2.2.3.3.	Análise do Modelo via Simulação .....	26

2.2.3.3.1.	Simulação de Monte Carlo .....	27
2.2.3.4.	Tomada de Decisão.....	29
2.2.3.4.1.	Indicadores estatísticos .....	30
2.2.3.4.2.	Indicadores de sensibilidade .....	31
2.2.4.	Análise de Risco no Projeto WindFloat 1.....	32
<b>3.</b>	<b>Formulação do Problema .....</b>	<b>35</b>
3.1.	Descrição do Projeto .....	35
3.1.1.	Visão Geral .....	35
3.1.2.	Fases de Execução .....	36
3.2.	Âmbito da Análise de Risco .....	38
3.2.1.	Fase de Demonstração vs. Fase Pré-Comercial .....	38
3.2.2.	Foco de Análise .....	39
3.2.2.1.	Análise de Cenários .....	41
3.2.3.	Proposta Metodológica .....	44
3.2.3.1.	Processo Alternativo .....	45
3.2.4.	Pressupostos.....	46
<b>4.</b>	<b>Ensaio da Proposta Metodológica .....</b>	<b>47</b>
4.1.	Sinopse.....	47
4.2.	Caso de Referência .....	48
4.2.1.	Desenvolvimento do Modelo.....	49
4.2.2.	Identificação das Incertezas .....	51
4.2.2.1.	<i>Weather Downtime</i> e Geração da <i>Timestamp</i> Aleatória .....	51
4.2.2.2.	Análise sem Reordenamento .....	54
4.2.2.3.	Análise com Reordenamento .....	57
4.2.3.	Simulação de Monte Carlo .....	61
<b>5.</b>	<b>Implementação .....</b>	<b>67</b>
5.1.	Modelo de Projeto.....	67
5.2.	Identificação das Incertezas .....	69
5.2.1.	Chegada das Plataformas .....	69
5.2.2.	Análise de Sensibilidade .....	70
5.2.2.1.	<i>Weather Downtime</i> .....	70
5.2.2.1.1.	Ponto de Compromisso.....	74
5.2.2.2.	Reordenamento das Atividades .....	76
5.3.	Simulação de Monte Carlo Final .....	79
5.3.1.	Apresentação dos Resultados.....	79

5.3.1.1. Montagem dos Aerogeradores .....	79
5.3.1.2. Instalação <i>Offshore</i> .....	86
5.3.2. Discussão dos Resultados .....	91
<b>6. Considerações Finais .....</b>	<b>99</b>
<b>Referências .....</b>	<b>103</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>107</b>
Anexo A – Ajuste das Distribuições .....	107
Anexo B – Modelo de Projeto .....	109
Anexo C – <i>Outputs</i> do Plano Base .....	115
Anexo D – <i>Outputs</i> do Plano Otimizado.....	117





## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Potência instalada [MW] na Europa em ambiente <i>offshore</i> .....	7
Figura 2.2 – Protótipo WF 1 .....	10
Figura 2.3 – Estrutura e componentes principais do protótipo WF 1 .....	11
Figura 2.4 – Classificação das abordagens metodológicas de análise de risco .....	14
Figura 2.5 – Listagem das principais metodologias determinísticas de análise de risco	15
Figura 2.6 – Listagem das principais metodologias estocásticas de análise de risco .....	16
Figura 2.7 – Exemplo de CPM .....	18
Figura 2.8 – Exemplo de CCPM.....	22
Figura 2.9 – Processo de análise de risco praticado no projeto WF 1 .....	33
 Figura 3.1 – Diagrama das fases do projeto WFA .....	 36
Figura 3.2– Âmbito da análise de risco .....	40
Figura 3.3 – Proposta metodológica .....	44
 Figura 4.1 – Diagrama de precedências do caso de referência .....	 48
Figura 4.2 – Modelo de projeto do caso de referência.....	49
Figura 4.3 – Modelo de projeto do caso de referência (sem nivelamento).....	49
Figura 4.4 – Modelo de projeto final do caso de referência .....	50
Figura 4.5 – WDT para a timestamp gerada aleatoriamente e para as 27 <i>timestamps</i> subsequentes .....	52
Figura 4.6 – Perfil de <i>Hs</i> .....	53
Figura 4.7 –Fluxograma da metodologia de análise (sem reordenamento).....	54

Figura 4.8 – Cronograma do caso de referência para a iteração exemplificada (sem reordenamento) .....	57
Figura 4.9 – Fluxograma da metodologia de análise (com reordenamento) .....	58
Figura 4.10 – Cronograma do caso de referência para a iteração exemplificada (com reordenamento) .....	60
Figura 4.11 – Horas adicionadas ao plano base do caso de referência (com reordenamento) .....	62
Figura 4.12 – Horas adicionadas ao plano base do caso de referência por atividade (com reordenamento) .....	63
Figura 4.13 – Frequência do reordenamento das atividades B1 e A2 .....	64
Figura 4.14 – Horas adicionadas ao plano base do caso de referência (sem reordenamento) .....	65
Figura 4.15 – Duração total do caso de referência (com reordenamento) .....	66
Figura 5.1 – Modelo de projeto sumário.....	68
Figura 5.2 – Distribuições das datas de chegada das plataformas WFA ao porto de Sines .....	70
Figura 5.3 – Modelo de projeto sumário otimizado.....	75
Figura 5.4 – Conclusão da montagem dos aerogeradores .....	79
Figura 5.5 – Duração total da montagem dos aerogeradores (com e sem reordenamento) .....	80
Figura 5.6 – WDT total na montagem dos aerogeradores .....	81
Figura 5.7 – Tempo até à conclusão da montagem do primeiro aerogerador (WFA 1 ou WFA 2) .....	82
Figura 5.8 – Duração da grua no porto de Sines.....	82
Figura 5.9 – Data de saída dos cais do porto de Sines dos WFA .....	83
Figura 5.10 – Duração dos WFA nos cais do porto de Sines .....	84
Figura 5.11 – Tempo de espera entre o fim da montagem dos aerogeradores e a saída dos WFA.....	85
Figura 5.12 – Conclusão da instalação <i>offshore</i> .....	86
Figura 5.13 – Duração total da instalação <i>offshore</i> .....	87
Figura 5.14 – WDT total na instalação <i>offshore</i> .....	88
Figura 5.15 – Duração da utilização do navio 1, do navio 2 e dos rebocadores 1 e 2....	89
Figura 5.16 – Duração da utilização do navio 1, do navio 2 e dos rebocadores 1 e 2....	90
Figura 5.17 – Tempo de espera do navio 2 pelo WFA 2 e pelo WFA 3 .....	91
Figura 5.18 – Probabilidade de ter WDT durante a montagem dos aerogeradores para uma variação de $\pm 25\%$ na duração determinística (NET) das atividades.....	93

Figura 5.19 – Sequenciamento alternativo da instalação <i>offshore</i> .....	95
Figura 5.20 – Sequenciamento alternativo 2 da instalação <i>offshore</i> .....	96
Figura A.1 – Ajuste da distribuição de $V$ no porto de Sines.....	107
Figura A.2 – Ajuste da distribuição de $H_s$ em Viana do Castelo .....	108
Figura A.3 – Ajuste da distribuição de $V$ em Viana do Castelo .....	108
Figura A.4 – Modelo de projeto.....	113



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Estruturas em ambiente <i>offshore</i> .....	8
Tabela 4.1 – Particularidades do caso de referência.....	48
Tabela 4.2 – Resumo da iteração exemplificada .....	61
Tabela 5.1 – WDT expectável durante a montagem dos aerogeradores.....	71
Tabela 5.2 – WDT expectável durante a instalação <i>offshore</i> .....	72
Tabela 5.3 – WDT expectável durante a montagem dos aerogeradores nas duas quinzenas de abril e nas duas quinzenas de maio .....	73
Tabela 5.4 – WDT expectável durante a instalação <i>offshore</i> nas duas quinzenas de maio e nas duas quinzenas de junho .....	74
Tabela 5.5 – Duração expectável da montagem dos aerogeradores na primeira quinzena de maio para um WDT máximo de X h.....	77
Tabela 5.6 – Duração expectável da instalação <i>offshore</i> na primeira quinzena de junho para um WDT máximo de Y h.....	78
Tabela A.1 – Datas de fim, durações e WDT expectáveis para os sumários de atividades do projeto WFA (segundo o plano base) .....	115
Tabela A.2 – Datas de fim, durações e WDT expectáveis para os sumários de atividades do projeto WFA (segundo o plano otimizado) .....	117



## Lista de Siglas e Notações

AHTS	<i>Anchor Handling Tug Supply</i>
CCPM	<i>Critical Chain Project Management</i>
CPM	<i>Critical Path Method</i>
CREA	<i>Clinical Risk and Error Analysis</i>
DMRA	<i>Decision Matrix Risk Assessment</i>
EPCI	<i>Engineering, Procurement, Construction and Installation</i>
ETA	<i>Event Tree Analysis</i>
EWEA	<i>European Wind Energy Association</i>
FEED	<i>Front-End Engineering Design</i>
FF	<i>Finish-to-Finish</i>
FS	<i>Finish-to-Start</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
HAZID	<i>Hazard Identification Study</i>
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i>
HIRA	<i>Hazard Identification and Risk Assessment</i>
HEAT	<i>Human Error Analysis Technique</i>

HFEA	<i>Human Factor Event Analysis</i>
IC	Índice Crítico
ICO	Índice de Correlação
IS	Índice de Significância
ISE	Índice de Sensibilidade
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
PDM	<i>Precedence Diagramming Method</i>
PEA	<i>Predictive, Epistemic Approach</i>
PERT	<i>Program Evaluation Review Technique</i>
PRAT	<i>Proportional Risk Assessment Technique</i>
QADS	<i>Quantitative Assessment of Domino Scenarios</i>
RBM	<i>Risk-based Maintenance</i>
RMSR	<i>Risk Measures of Societal Risk</i>
ROV	<i>Remotely Operated Underwater Vehicle</i>
SF	<i>Start-to-Finish</i>
SS	<i>Start-to-Start</i>
STEP	<i>Sequentially Timed Even Plotting</i>
WDT	<i>Weather Downtime</i>
WF	WindFloat
WFA	WindFloat Atlantic
WRA	<i>Weighted Risk Analysis</i>
$\rho$	Coeficiente de Spearman,
$\hat{\mu}_c$	Estimativa da média da duração de um projeto



$\hat{\sigma}_c$	Estimativa do desvio padrão da duração de um projeto
$DA$	Duração da atividade
$\overline{DA}$	Média da duração da atividade
$DP$	Duração do projeto
$\overline{DP}$	Média da duração do projeto
$DPS$	Duração do projeto simulada
$\overline{DPS}$	Média da duração do projeto simulada
$e$	Variável aleatória
$E(x)$	Valor esperado de $x$
$FA$	Folga da atividade
$Hs$	Altura significativa de ondas [m]
$I$	Corrente [A]
$P$	Probabilidade
$P_x$	Percentil $x$
$R$	Resistência [ $\Omega$ ]
$T$	Período de tempo
$tE$	Duração esperada
$tM$	Estimativa mais provável
$tO$	Estimativa otimista
$tP$	Estimativa pessimista
$U$	Tensão [V]
$V$	Velocidade média de vento [m/s]





# 1. Introdução

## 1.1. Motivação

Numa época em que a energia renovável assume um papel fundamental para a sustentabilidade do planeta, novas formas de a produzir têm atraído a atenção de diversos países à volta do globo. Com o aumento progressivo do consumo energético e tendo já sido provados os efeitos negativos da utilização dos combustíveis fósseis a nível ambiental, a necessidade do aumento das energias verdes tem-se materializado ao longo dos últimos anos por forma a fazer-se face às novas exigências.

A energia eólica *offshore* tem-se revelado como uma alternativa de elevado potencial. As muitas vantagens que esta fonte de energia apresenta quando comparada com outras fontes levam a que se invista cada vez mais nesta nova solução energética. Factos como velocidades de vento mais elevadas e consequente incremento da geração de energia elétrica dão origem a que sejam instalados parques eólicos em ambiente *offshore* em várias zonas geográficas. Não obstante, existem também alguns constrangimentos na implementação de projetos desta dimensão que carecem de um olhar mais atento, nomeadamente os riscos.

Qualquer projeto tem por base um investimento de recursos com o princípio de alcançar determinados objetivos. A criação de bens de valor como produtos e serviços é, em grande maioria, o principal critério para investir, e a busca pelo desenvolvimento e pela inovação reflete-se num crescimento acentuado do número de novos projetos que trazem valor para a sociedade. O setor da energia eólica *offshore* é apenas um de muitos

exemplos onde novos projetos estão atualmente a ser implementados com uma maior frequência numa tentativa de revolucionar o mercado elétrico. Só que dada a falta de *know-how* por parte dos países que estão agora a entrar neste novo domínio, gerir projetos desta natureza requer uma mais cuidada abordagem comparativamente a outros projetos de engenharia, sobretudo no que toca à panóplia de riscos que lhes está associada.

Em geral, os riscos designam estados de incerteza que podem ter efeitos positivos ou negativos nos objetivos de um projeto. Assim sendo, se um gestor de projeto for capaz de tratar esses estados de incerteza de forma pró-ativa, os resultados que daí advêm podem ser deveras interessantes, desde a minimização do impacto das ameaças até à maximização do aproveitamento das oportunidades. Isso é possível através da análise de risco, que surge como um método que fornece informação sensível para atividades individuais de um projeto com o propósito de avaliar as prováveis consequências da incerteza no desempenho do mesmo.

Dado que todos os projetos têm as suas próprias características, pois variam em escala e complexidade e têm determinados requisitos a preencher, proceder a uma análise de risco que se adapte às necessidades e que seja eficiente é a chave para alcançar o sucesso. Posto isto, uma vez que a instalação de um parque eólico *offshore* é um tipo de projeto muito peculiar e que requer um elevado investimento de recursos, a análise de risco, sobretudo durante uma fase tão crítica como é a fase de planeamento, é determinante para a redução da sua duração e, por conseguinte, do seu custo. Este tipo de projeto torna-se, assim, não só num desafio ao nível da área de engenharia como também ao nível da capacidade de analisar a incerteza que lhe é inerente, o que lhe lega ainda mais interesse e valor.

## 1.2. Objetivos

Por forma a proceder à realização desta dissertação foram traçados os seguintes objetivos:

- Maturação do projeto em estudo, das suas características e dos seus requisitos;

- Elaboração de um caso de referência que permita definir e testar a metodologia de análise a aplicar no projeto e que pressupõe os vários passos a cumprir na fase de implementação subsequente;
- Desenvolvimento do modelo de projeto através da criação da linha de base do respetivo cronograma (plano base) com recurso à ferramenta Microsoft Project;
- Integração do modelo de projeto desenvolvido na ferramenta @RISK (*add-in* para Microsoft Excel) e consequente identificação das suas incertezas – aplicação da metodologia de análise;
- Análise do modelo de risco através da simulação de Monte Carlo;
- Discussão dos resultados obtidos e apresentação de soluções e/ou sugestões para apoio à tomada de decisão.

### 1.3. Contribuição Original

A contribuição original desta dissertação reside maioritariamente no desenvolvimento de uma metodologia, por integração de metodologias já existentes, que permita efetuar a modelação, análise e otimização da sequência de montagem, transporte e instalação de um parque eólico *offshore*. As variáveis consideradas incluem a restrição de recursos, a incerteza das condições meteorológicas e a duração das atividades. Esta ação permitirá às entidades responsáveis pelo projeto em estudo – fase pré-comercial do projeto WindFloat Atlantic (WFA), conduzido pelo consórcio WindPlus – comparar os resultados obtidos através dos seus modelos de risco com os resultados obtidos através desta nova abordagem, o que irá apoiar na tomada de decisão e, como consequência, no esboço de um planeamento mais sólido e bem definido.

Apesar de o foco desta dissertação incidir num projeto em particular, pretende-se que a metodologia de análise desenvolvida possa também contribuir para a otimização do planeamento da instalação de futuros projetos *offshore* que utilizem a tecnologia WindFloat (WF). Além disso, é ainda objetivo desta dissertação que a mesma metodologia seja transversal a outro tipo de projetos e que possa ser facilmente adotada por outras organizações, bastando, para isso, ajustá-la às características e necessidades dos respetivos projetos.

## 1.4. Organização da Dissertação

Este documento está organizado em seis capítulos:

- **Capítulo 1: Introdução** – o presente capítulo;
- **Capítulo 2: Análise de Risco no contexto da Energia Eólica *Offshore*** – levantamento do estado da arte com abordagem, numa primeira parte, ao setor da energia eólica *offshore* e, numa segunda parte, à análise risco.
- **Capítulo 3: Formulação do Problema** – descrição do projeto em estudo e apresentação do âmbito do processo de análise de risco a realizar na dissertação;
- **Capítulo 4: Ensaio da Proposta Metodológica** – exposição da metodologia de análise a aplicar no projeto em estudo através da elaboração e esclarecimento passo-a-passo de um caso de referência;
- **Capítulo 5: Implementação** – aplicação da metodologia de análise ao projeto em estudo com particular referência e discussão dos resultados obtidos;
- **Capítulo 6: Considerações Finais** – uma reflexão acerca do trabalho desenvolvido e dos futuros desafios associados ao tema.



## **2. Análise de Risco no contexto da Energia Eólica *Offshore***

Neste capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica (estado da arte) efetuada face ao âmbito da presente dissertação. Na secção 2.1 faz-se uma abordagem ao setor da energia eólica *offshore* com especial alusão ao respetivo panorama global, à tecnologia e ao projeto WF 1. Na secção 2.2 faz-se uma abordagem à análise risco com a apresentação da definição, das principais metodologias utilizadas e do processo de execução habitualmente praticado. Na secção 2.2 aborda-se ainda o processo de análise do risco implementado no projeto WF 1.

### **2.1. Energia Eólica *Offshore***

#### **2.1.1. Panorama Global**

Com o desenvolvimento tecnológico tem havido um forte aumento do investimento de recursos no setor energético mundial, em particular no que toca à energia eólica *offshore*. Apesar de o investimento ser muito superior ao dos parques eólicos *onshore*, os parques eólicos *offshore* têm revelado ser um mercado cada vez mais competitivo.

A energia eólica *offshore* possui um elevado potencial ao nível da sustentabilidade energética, o que a leva a ser, nos dias de hoje, uma das melhores alternativas à geração de energia elétrica através de fontes não renováveis. Embora a energia eólica *onshore* tenha crescido exponencialmente ao longo dos últimos anos e seja uma alternativa

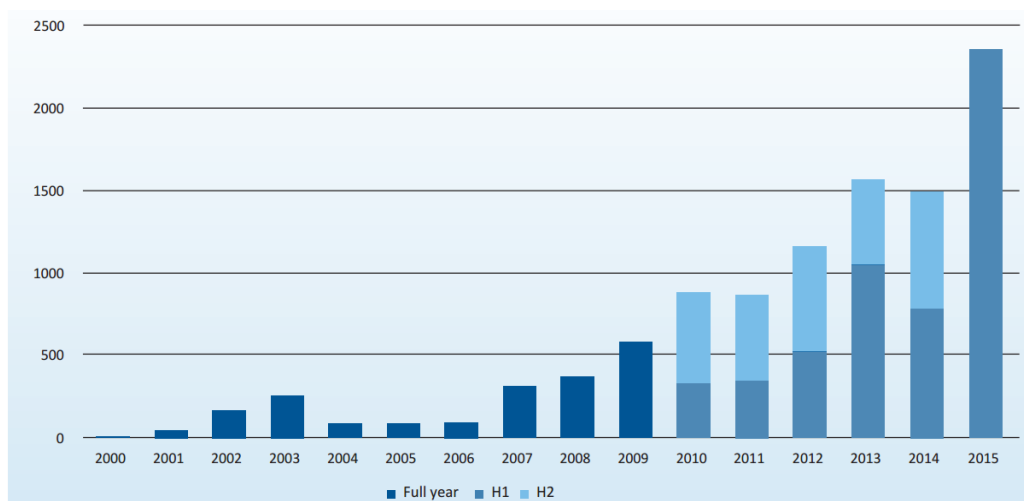
igualmente viável, esta tem sido muitas vezes criticada devido à utilização abusiva de terrenos, à poluição sonora e ao impacto visual. Estas razões, aliadas ao facto de locais em terra para a instalação de novos aerogeradores serem cada vez mais escassos, dão origem a que cada vez mais se transfiram este tipo de projetos para áreas marítimas, o que traz ainda mais algumas vantagens, nomeadamente [1] [2]:

- Extensas áreas marítimas disponíveis para explorar;
- Velocidades de vento mais elevadas e menor turbulência;
- Facilidade de transporte de turbinas multi-MW para os locais de comissionamento;
- Menor resistência das populações.

A Europa é o líder mundial em energia eólica *offshore*. Embora existam parques eólicos *offshore* espalhados pelo globo, foi na zona norte do continente europeu que a exploração desta fonte de energia renovável rapidamente se desenvolveu, com o primeiro parque eólico a ser inaugurado na Dinamarca em 1991 [3]. Desde então, o setor energético europeu tem feito um esforço para se afastar de fontes de energia como o petróleo, o carvão e o gás natural. Como prova disso mesmo, no final de 2014 já haviam sido instalados 128,8 GW de potência eólica, sendo que cerca de 8 GW correspondiam a energia eólica *offshore*. Num ano com condições normais de vento, essa mesma potência seria capaz de produzir 284 TWh de eletricidade, o suficiente para cobrir 10,2% do consumo de eletricidade da União Europeia, sendo que aproximadamente 1% seria proveniente de energia eólica *offshore* [4].

Na primeira metade de 2015, a Europa conectara à rede elétrica um total de 584 turbinas eólicas *offshore* com uma capacidade combinada de 2342,9 MW. Além disso, 15 parques eólicos estavam em edificação nesse mesmo período, os quais, uma vez concluídos, levarão a um aumento da capacidade total em mais de 4268,5 MW [5]. A figura 2.1 ilustra a evolução da potência instalada [MW] na Europa entre o ano de 2000 e o primeiro semestre do ano de 2015:





**Figura 2.1 – Potência instalada [MW] na Europa em ambiente *offshore*** (retirado de [5, p. 3])<sup>1</sup>

Como se pode verificar na figura 2.1, no primeiro semestre (H1) de 2015 a potência instalada aumentou em mais de 200% comparativamente ao período homólogo anterior, o que comprova o rápido progresso deste sector. Assim, com o propósito de dar seguimento a este crescimento, a Associação Europeia de Energia Eólica (*European Wind Energy Association* – EWEA) estabeleceu como meta uma potência instalada total de 40 GW até 2020 [6]. Para isso muito tem contribuído o Reino Unido, sendo o principal explorador de energia eólica *offshore* desde outubro de 2008 com uma capacidade instalada de 4494,4 MW e sendo detentor dos três maiores parques eólicos a nível mundial: London Array com uma capacidade instalada de 630 MW, Gwynt y Mor com 576 MW e Grande Gabbard com 504 MW [7]. Depois do Reino Unido seguem-se a Dinamarca e a Alemanha com 1271 MW e 1048,9 MW de capacidade instalada, respetivamente [8].

### 2.1.2. Tecnologia

Um parque eólico pode ser simplesmente definido como um grupo de aerogeradores localizados na mesma área de proximidade. Uma vez que o tipo de aerogeradores utilizado em ambiente *offshore* é semelhante ao tipo de aerogeradores utilizado em ambiente *onshore*, a principal diferença entre os dois conceitos está no facto de os

<sup>1</sup> H1 – *half year* 1 (semestre 1); H2 – *half year* 2 (semestre 2).

aerogeradores *offshore* requererem a existência de estruturas próprias que os sustentem no mar de modo a garantir a sua estabilidade.

Existem dois grandes grupos de estruturas em ambiente *offshore*: estruturas fixas e estruturas flutuantes. As primeiras estão maioritariamente localizadas em águas pouco profundas, tipicamente até 30 m de profundidade, e as segundas em águas que vão para além dos 50 m de profundidade.<sup>2</sup> Na tabela 2.1 são revelados os tipos de estruturas existentes:

**Tabela 2.1 – Estruturas em ambiente *offshore*** (adaptado de [9, p. 76])

<b>Estruturas Fixas</b>	<b>Estruturas Flutuantes</b>
<i>Monopile</i>	
Gravítica	<i>Spar floater</i>
<i>Tripile</i>	<i>Tension leg platform</i>
<i>Jacket</i>	<i>Barge floater</i>
Trípode	

O recurso a estruturas flutuantes, ao permitirem a instalação de parques eólicos em zonas de águas profundas, permitem que haja um maior aproveitamento do vento por parte dos aerogeradores e subsequente aumento da produção de energia elétrica. Além disso, as estruturas flutuantes têm ainda outras vantagens sobre as estruturas fixas que envolvem baixas implicações de risco a vários níveis, tais como [10]:

- **Fabrico das estruturas:**
  - Efetuado exclusivamente em terra;
  - Todas as estruturas são semelhantes, o que facilita a sua industrialização;
  - O processo de engenharia segue rigorosas orientações da indústria naval;
- **Fixação *offshore*:**
  - Conduzida através de uma conhecida e largamente utilizada tecnologia de ancoragem;

---

<sup>2</sup> Em águas intermédias (30-50 m de profundidade) também é possível usar estruturas fixas, mas estas não são tão comuns como, por exemplo, as *monopile*.

- Os trabalhos de ancoragem são, teoricamente, bem-sucedidos em vários tipos de solos;
- Exige uma parca necessidade de investigação do fundo marinho;
- **Transporte e Instalação:**
  - Pequenas janelas temporais necessárias para o processo de instalação;
  - Operações simples de serem conduzidas em ambiente *offshore*;
  - Sem necessidade de recorrer a navios especiais de instalação;
- **Operação e Manutenção:**
  - Pequenas janelas temporais necessárias para o processo de manutenção dos aerogeradores;
  - Operações simples de serem conduzidas em ambiente *offshore*;
  - Sem necessidade de recorrer a navios especiais de manutenção;
- **Descomissionamento:**
  - Operação simples de realizar;
  - Sem qualquer impacto no local;
  - Parte dos trabalhos são realizados em terra.

Apesar das muitas vantagens das estruturas flutuantes, esta tecnologia ainda está numa fase pré-comercial, daí que, atualmente, todos os parques eólicos existentes sejam de estrutura fixa, estando localizados sobretudo no Mar do Norte e no Mar Báltico [11]. No entanto, 70% do mundo é composto por águas profundas, o que significa que a grande maioria dos futuros dispositivos eólicos *offshore* tendam a ser constituídos por estruturas flutuantes, como é o caso do semi-submersível WF 1 em Portugal [12].

### 2.1.3. Projeto WindFloat 1

Portugal tem um elevado potencial para investir em energia eólica *offshore* dada a sua extensa costa marítima. Há um potencial limitado para profundidades inferiores a 40 m e Portugal tem cerca de 250 km de linha costeira totalmente livres para serem explorados. Somado a isto, existem ainda diversas possibilidades de ligação à rede elétrica perto da costa, o que se revela em mais uma vantagem para a integração de dispositivos eólicos *offshore* no sistema elétrico nacional [1] [10].

Em 2011 Portugal inaugurou o seu primeiro dispositivo eólico *offshore* na sequência do projeto WF 1. Este dispositivo está localizado em Aguçadoura, perto da

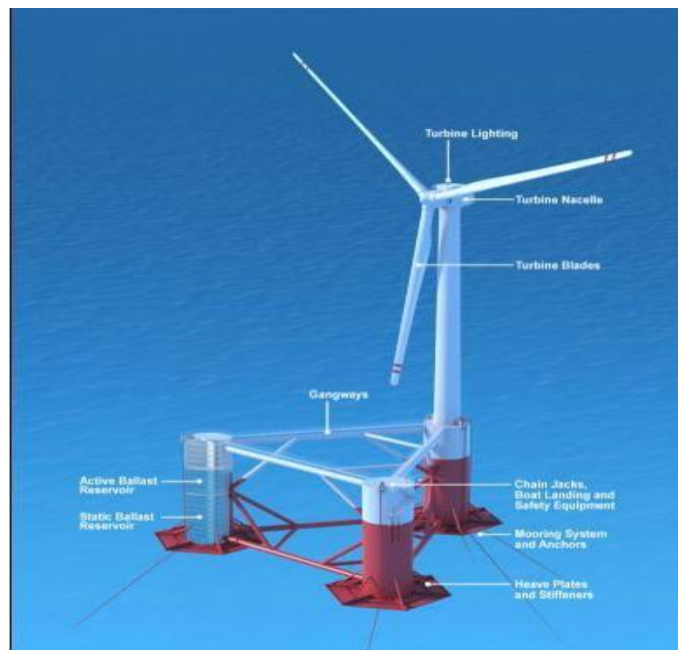
Póvoa do Varzim, a 6 km da costa, aproximadamente, e a uma profundidade entre os 40 e os 50 m. Equipado com um aerogerador convencional de 2 MW e uma inovadora plataforma flutuante que permite ter um elevado desempenho em termos de estabilidade, este sistema corresponde a um projeto de demonstração que tem como objetivo obter dados operacionais e conhecimentos diversos que possam ser aplicados em projetos futuros [1]. O protótipo em questão está ilustrado na figura 2.2:



**Figura 2.2 – Protótipo WF 1** (retirado de [13])

A plataforma é do tipo semi-submersível e está ancorada ao leito do mar através de quatro linhas de amarração, sendo estas compostas exclusivamente por âncoras de arrasto e correntes-cabo formadas por três segmentos: corrente – cabo – corrente. A sua estabilidade é conseguida através de um sistema de tanques que se encham de água na base das três colunas (lastro estático), dispostas na forma de um triângulo equilátero, associado a um sistema de lastro ativo (dinâmico). Resumidamente, o lastro estático, constituído por água dentro do fundo das três colunas, tem como objetivo aumentar o calado da estrutura quando instalado, o que resulta numa maior estabilidade; o lastro ativo, ao mover a água entre as três colunas, compensa os esforços provocados pela passagem do vento no aerogerador com o objetivo de o manter na vertical de modo a maximizar o seu rendimento e a reduzir as cargas a que está sujeito. O aerogerador, de eixo horizontal, apesar de preparado para instalações *offshore*, é baseado nos sistemas tradicionais. Ele é composto por uma torre, no topo da qual se localiza a *nacelle*

(invólucro que contém o sistema que converte a energia cinética do movimento de rotação do rotor em energia elétrica), cuja posição é ajustável em torno do eixo vertical para que o rotor esteja orientado a favor do vento, e três pás [14]. Na figura 2.3 estão representados a estrutura do protótipo e os respetivos componentes principais:



**Figura 2.3 – Estrutura e componentes principais do protótipo WF 1** (retirado de [10, p. 10])

Este dispositivo corresponde ao primeiro projeto no Oceano Atlântico a apresentar uma estrutura flutuante semi-submersível que suporta um aerogerador e o primeiro a nível mundial a não requerer o uso de quaisquer navios com capacidade de elevação ou pesados sistemas de construção e montagem em alto mar [1]. Todo o processo de montagem, instalação e pré-comissionamento tiveram lugar em terra, em ambiente controlado, numa das docas secas dos Estaleiros Navais de Lisboa (Lisnave), a leste da cidade de Setúbal. Após a construção em terra, o dispositivo WF 1 foi transportado para o oceano e rebocado cerca de 400 km para o local de comissionamento, recorrendo, para isso, ao mesmo navio utilizado para a instalação prévia do cabo submarino e do sistema de âncoras e linhas de amarração [14].

Com este projeto ficou provado que a energia eólica *offshore* flutuante representa uma grande oportunidade para Portugal. A infraestrutura existente no país pode ser adaptada de modo a suportar uma indústria *offshore* com elevado potencial de crescimento tanto a nível nacional como a nível internacional. Além disso, os projetos

podem ter um custo e um risco reduzidos como resultado do fabrico em terra e do esquema de comissionamento utilizado.

## **2.2. Análise de Risco em Projetos**

### **2.2.1. Definição**

O risco consiste num evento ou numa condição incerta que, ao ocorrer, terá um efeito positivo ou negativo num ou mais objetivos de um projeto, tais como o âmbito, o calendário, o custo e a qualidade do mesmo [15] [16]. Este conceito deriva do conceito de incerteza na medida em que não se sabe qual será o efeito futuro de uma dada ação do presente, podendo ser fruto de uma ou mais causas e podendo ter um ou mais efeitos no desempenho de um projeto [16] [17]. Como consequência, o propósito da análise de risco passa por quantificar/caracterizar a probabilidade e o impacto dos eventos ou condições que ocorrem ao longo do ciclo de vida de um projeto, consoante estes sejam positivos ou negativos, respetivamente [16].

A análise de risco em projetos é o processo da gestão de risco que se refere ao uso sistemático de informação disponível por forma a determinar quão frequentemente certos eventos ou condições podem ocorrer e o impacto das suas consequências, permitindo proceder à sua avaliação e à definição de mecanismos de resposta que possam mitigar e/ou potenciar esse mesmo impacto [16] [18]. A análise de risco pode ser qualitativa ou quantitativa, sendo que a primeira incide numa análise menos detalhada e mais subjetiva dos riscos e a segunda numa análise mais pormenorizada e objetiva [19]. Não obstante, ambas têm como principal objetivo cooperar na tomada de decisão, permitindo uma melhor compreensão dos resultados que possam vir a ocorrer [17].

A análise de risco qualitativa tem como vantagem habilitar os gestores de projeto a reduzir o nível de incerteza e a focar nos riscos que possuem uma maior valoração ou prioridade. Este processo avalia a prioridade dos riscos identificados usando a sua probabilidade de ocorrência, o impacto correspondente nos objetivos do projeto e a resposta por parte da equipa de projeto quando os eventos ou condições efetivamente ocorrem. A análise qualitativa das informações disponíveis sobre os riscos de um projeto ajuda à avaliação da importância do risco para o projeto como um todo, podendo vir ou não a exigir uma análise quantitativa [16].

A análise de risco quantitativa procura associar valores numéricos ao efeito dos riscos de um projeto, ou através da utilização de dados empíricos, ou através da quantificação de declarações qualitativas. Este processo tem como vantagem a produção de informações quantitativas dos riscos que permitem apoiar na tomada de decisão a fim de reduzir o grau de incerteza dos projetos. É um tipo de análise que é executada sobre os riscos que foram priorizados pelo processo qualitativo, avaliando o efeito agregado destes nos objetivos dos projetos [16].

## 2.2.2. Abordagens Metodológicas

De modo geral, a análise de risco está intimamente relacionada com a necessidade de avaliar o grau de incerteza a que está associada uma tomada de decisão. O conceito de risco deriva da inability de prever o futuro e, como tal, é necessário recorrer a técnicas que auxiliem no processo de gestão de situações sujeitas a essa mesma incerteza [17] [20].

Existem diversas abordagens metodológicas que se podem aplicar num processo de análise de risco e que se encontram disponíveis na literatura científica, estando estas normalmente divididas em duas abordagens distintas: a abordagem determinística e a abordagem estocástica (probabilística) [21].

Enquanto a abordagem determinística resulta num modelo de projeto que não envolve incerteza, a abordagem estocástica resulta no exato oposto. Em modelos determinísticos, as variáveis de saída (*outputs*) são inteiramente determinadas pelos parâmetros de entrada (*inputs*) e pelas condições iniciais. Em modelos estocásticos, a mesma gama de parâmetros de entrada e condições iniciais dá origem a um diferente grupo de variáveis de saída, uma vez que este tipo de modelos possui, intrinsecamente, aleatoriedade [22].

Um simples exemplo da diferença entre um modelo determinístico e um modelo estocástico pode ser dado pela Lei de Ohm:

$$U = R \times I \quad (2.1)$$

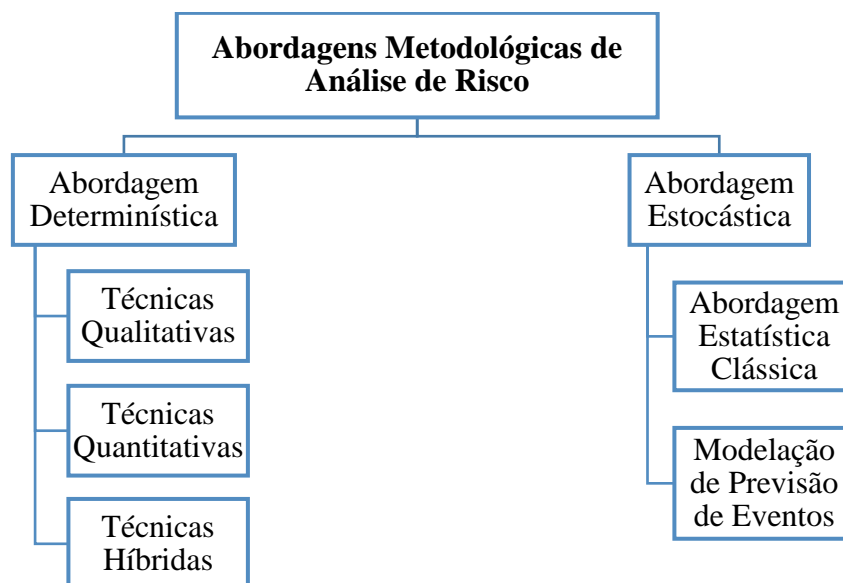
Onde  $U$  se refere à tensão [V],  $R$  à resistência [ $\Omega$ ] e  $I$  à corrente [A]. Esta expressão representa um modelo determinístico, pois os valores de ambas as variáveis de entrada,  $R$  e  $I$ , estão previamente determinados, o que resulta num único conjunto de saída,  $U$ . Basicamente, esta equação corresponde a um tipo de processo que pode ser modelado

analiticamente, uma vez que há apenas uma combinação das variáveis de entrada – existe apenas um único valor possível para cada variável [17]. No caso de um modelo estocástico:

$$U = R \times I + e \quad (2.2)$$

Onde  $e$  designa uma variável aleatória. Assuma-se que esta variável é introduzida com o objetivo de caracterizar os desvios entre a tensão atual e os valores de tensão previstos pela expressão determinística (2.1). Uma vez que entradas aleatórias conduzem a saídas aleatórias, estas são consideradas estimativas das verdadeiras características do modelo. Contrariamente à abordagem determinística, a abordagem estocástica está mais próxima da realidade, pois possui um padrão cujo estado é indeterminado, tendo origem em eventos ou condições aleatórias [17].

Na figura 2.4 está representada a classificação das abordagens metodológicas de análise de risco:

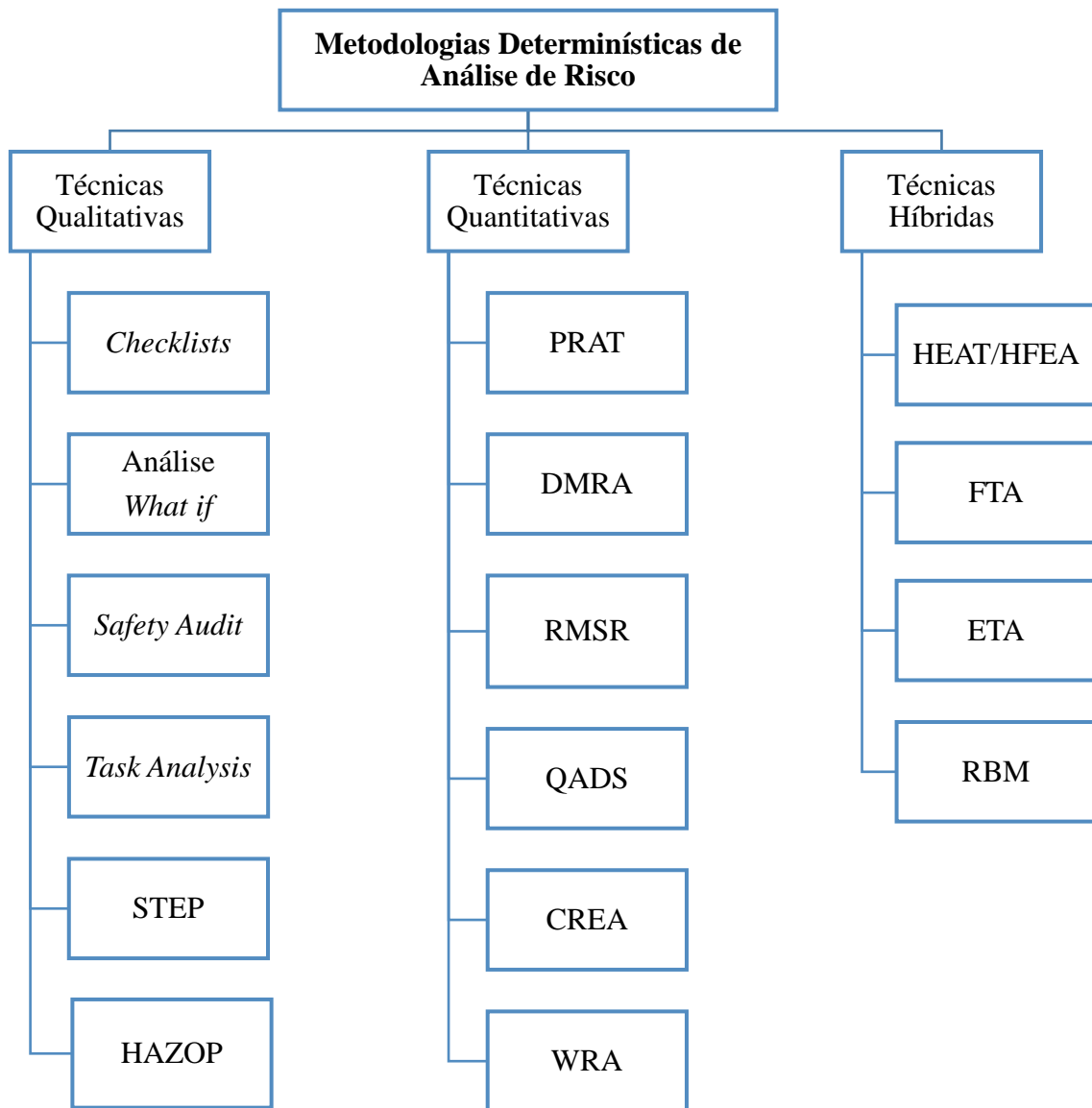


**Figura 2.4 – Classificação das abordagens metodológicas de análise de risco** (adaptado de [21, p. 449])



### 2.2.2.1. Abordagem Determinística

Na figura 2.5 é apresentada a listagem das principais metodologias utilizadas em processos de análise de risco de acordo com a abordagem determinística, a qual inclui técnicas qualitativas, quantitativas e híbridas:<sup>3</sup>

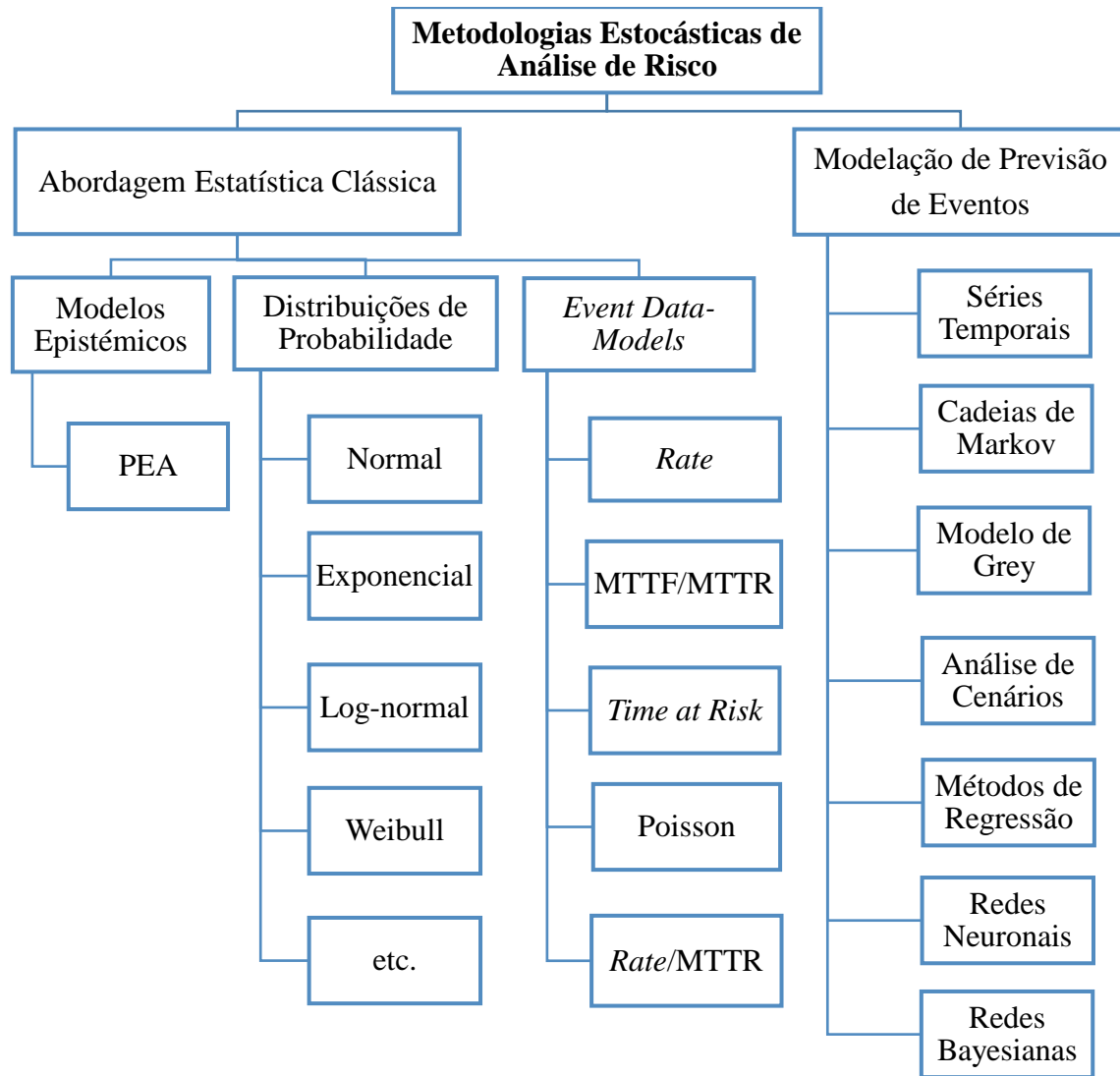


**Figura 2.5 – Listagem das principais metodologias determinísticas de análise de risco** (adaptado de [21, p. 450])

<sup>3</sup> Para uma descrição detalhada das várias metodologias apresentadas na figura 2.5, consultar as referências [20] e [21]. Para conhecer o significado das respectivas siglas, consultar a Lista de Siglas e Notações da presente dissertação.

### 2.2.2.2. Abordagem Estocástica

Na figura 2.6 é apresentada a listagem das principais metodologias utilizadas em processos de análise de risco de acordo com a abordagem estocástica, a qual inclui a abordagem estatística clássica e a modelação de previsão de eventos:<sup>4</sup>



**Figura 2.6 – Listagem das principais metodologias estocásticas de análise de risco** (adaptado de [21, p. 452])

<sup>4</sup> Para uma descrição detalhada das várias metodologias apresentadas na figura 2.6, consultar a referência [21]. Para conhecer o significado das respetivas siglas, consultar a Lista de Siglas e Notações da presente dissertação.

### 2.2.3. Processo de Execução

Ainda que a análise de risco quantitativa seja um tipo de análise mais complexo quando comparado à análise de risco qualitativa, este permite colmatar algumas indefinições provenientes do processo qualitativo ao fornecer estimativas numéricas que produzem resultados mais fiáveis e com elevada aplicação [19]. Por essa razão, a análise de risco quantitativa é amplamente utilizada pelas organizações que procuram resultados mais próximos da realidade, onde a segurança e a credibilidade dos mesmos são requisitos necessários para garantir o bom desempenho dos seus projetos [17] [20]. Para isso existe um processo de execução, conforme descrito abaixo, que é usualmente seguido [17] [23].

O primeiro passo numa análise de risco é reconhecer a necessidade para tal, ou seja, avaliar se de facto a situação em que se está interessado em analisar está sujeita a algum grau de incerteza significativo. Para isso é necessário quantificar os riscos identificados numa situação tida como incerta. Quantificar o risco significa determinar todos os valores possíveis que uma dada variável pode assumir e, conseqüentemente, determinar as possibilidades relativas de cada um desses mesmos valores [17]. Uma vez que a análise de risco quantitativa envolve técnicas mais sofisticadas, o recurso a ferramentas de *software* que incluam as incertezas identificadas torna-se uma mais-valia. Essa ação permite analisar o modelo de risco via simulação, o que facilita a interpretação dos resultados e a tomada de decisão por parte dos gestores de projeto [19]. Posto isto, o processo de análise de risco quantitativa de um projeto pode-se sumarizar nas quatro fases seguintes [17] [23]:

1. Desenvolvimento do modelo;
2. Identificação das incertezas;
3. Análise do modelo via simulação;
4. Tomada de decisão.

#### 2.2.3.1. Desenvolvimento do Modelo

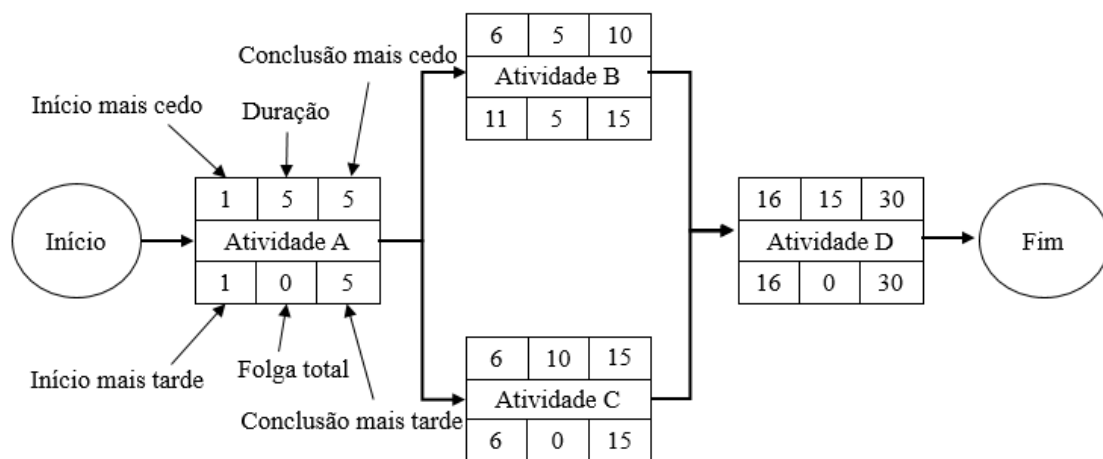
Como se constata na secção 2.2.2, existe um vasto leque de metodologias que podem ser aplicadas num processo de análise de risco. No entanto, no caso concreto do desenvolvimento de um modelo de projeto, a construção da linha de base do respetivo cronograma é o ponto de partida para proceder à análise de risco, existindo, para isso,

métodos específicos para o fazer [23]. Além disso, quando o projeto já estiver em marcha, este modelo pode ainda ser usado como referência para a comparação com os resultados reais [16]. Em seguida são apresentados alguns dos métodos mais comuns para o desenvolvimento de um modelo de projeto, podendo estes, tal como as metodologias tradicionais de análise de risco, seguir a abordagem determinística ou estocástica.

### 2.2.3.1.1. Método do Caminho Crítico

Genericamente, o Método do Caminho Crítico (*Critical Path Method* – CPM) é um procedimento utilizado para estimar a duração mínima de um projeto e para determinar o grau de flexibilidade dos caminhos lógicos da rede estabelecida no modelo do cronograma desse mesmo projeto [16]. Desenvolvido e apresentado no final da década de 50 por Morgan R. Walker e James E. Kelley (em [24]), o CPM é um método determinístico que representa as relações de dependência entre atividades, que deteta aquelas que são críticas (caminho crítico – *critical path*), que demonstra a folga das suas durações (tempo que uma atividade pode derrapar antes de afetar a data de conclusão do projeto) e que calcula a duração mínima para a conclusão de um projeto de acordo com as inter-relações da rede. Por estas razões, o CPM é um dos métodos mais adequados e utilizados para a calendarização, análise e controlo das atividades de um projeto [25].

Esta técnica calcula as datas de início e de conclusão tanto mais cedo como mais tarde para todas as atividades sem considerar quaisquer limitações de recursos, executando, para isso, uma análise dos caminhos de ida e volta através da rede do cronograma, como representado na figura 2.7:



**Figura 2.7 – Exemplo de CPM** (adaptado de [16, p. 177])

Neste exemplo, o caminho que apresenta a maior duração (representada em dias) é o que é constituído pelas atividades A, C e D, logo a sequência A-C-D corresponde ao caminho crítico. As datas de início e conclusão mais cedo e mais tarde são uma indicação dos períodos de tempo dentro dos quais uma atividade poderá ser realizada, sendo resultado dos parâmetros inseridos no modelo do cronograma para as durações das várias atividades, relações lógicas, antecipações, adiamentos e outras restrições. A folga total retrata a flexibilidade do cronograma, sendo medida, em qualquer caminho de uma rede de projeto, pela quantidade de tempo que uma atividade pode ser atrasada ou prolongada com base na data de início mais cedo sem atrasar a data de conclusão do projeto ou violar uma restrição do cronograma. Um caminho crítico é normalmente caracterizado por uma folga total igual a zero, mas também pode ser caracterizado por uma folga positiva ou negativa, dependendo apenas das restrições aplicadas ao cronograma [16]. A atividade B, por exemplo, tem uma folga total de cinco dias.

#### **2.2.3.1.2. Método do Diagrama de Precedência**

Diretamente relacionado com o CPM está o Método do Diagrama de Precedência (*Precedence Diagramming Method* – PDM), o qual corresponde a uma técnica que é utilizada para a criação de um modelo de cronograma onde as atividades são conectadas por um ou mais relacionamentos lógicos (dependências) de modo a demonstrar a sequência em que estas estão a ser realizadas. O PDM inclui quatro tipos de dependências [16]:

- *Finish-to-start* (FS) – uma atividade sucessora não pode ser iniciada até que a atividade antecessora tenha sido concluída;
- *Finish-to-Finish* (FF) – uma atividade sucessora não pode ser concluída até que a atividade antecessora tenha também sido concluída;
- *Start-to-Start* (SS) – uma atividade sucessora não pode ser iniciada até que a atividade antecessora tenha também sido iniciada;
- *Start-to-Finish* (SF) – uma atividade sucessora não pode ser concluída até que a atividade antecessora tenha sido iniciada.

Associadas a estas dependências está ainda a aplicação de tempos de antecipação (*lead time*) e de espera (*lag time*), uma técnica usada para ajustar a quantidade de tempo entre atividades antecessoras e sucessoras. O *lead time* corresponde à quantidade de

tempo que uma atividade sucessora pode ser adiantada em relação a uma atividade antecessora e o *lag time* corresponde à quantidade de tempo que uma atividade sucessora deve ser atrasada em relação a uma atividade antecessora [16].

O PDM é uma ferramenta que além de permitir criar um cronograma de projeto mais sólido e robusto, permite também compreender visualmente as dependências entre atividades dada a sua simplicidade, o que resulta em encontrar o caminho crítico com maior facilidade.

#### 2.2.3.1.3. Técnica de Revisão e Avaliação de Programa

De maneira geral, a Técnica de Revisão e Avaliação de Programa (*Program Evaluation Review Technique* – PERT) é uma ferramenta estatística que aplica uma média ponderada de estimativas otimista, pessimista e mais provável quando existe incerteza no que toca às estimativas das atividades de um projeto [16]. Analogamente ao CPM, esta técnica foi desenvolvida e apresentada no final da década de 50 (em [26]), tendo como autor empresarial o Departamento de Projetos Especiais da Marinha Americana. O PERT permite estimar o tempo que é necessário para a conclusão de cada atividade de um projeto e identifica o tempo mínimo necessário para a conclusão desse mesmo projeto como um todo, usando, para isso, um diagrama detalhado da rede estabelecida no modelo do cronograma, o qual representa as dependências entre as várias atividades [27].

Ao contrário do CPM, o PERT pode trabalhar através de uma rede determinística e adicionar durações probabilísticas às atividades. Assim, uma vez estabelecida a rede do projeto será tempo de estimar a duração das atividades por forma a identificar o caminho crítico. Sabendo que a precisão das estimativas da duração de uma determinada atividade pode ser aperfeiçoada ao considerar-se o seu grau de incerteza, o PERT utiliza três estimativas para definir uma faixa aproximada para a duração dessa mesma atividade [16]:

- **Mais provável ( $tM$ )** – estimativa baseada na duração da atividade tendo em conta os recursos prováveis de serem assignados, a sua produtividade, expectativas realistas de disponibilidade para realizar a atividade, dependências de outros participantes e interrupções;

- **Otimista** ( $tO$ ) – estimativa baseada na análise do melhor cenário para a atividade;
- **Pessimista** ( $tP$ ) – estimativa baseada na análise do pior cenário para a atividade.

Dependendo dos valores de distribuição assumidos na faixa das três estimativas, a duração esperada ( $tE$ ) pode ser calculada através de uma expressão analítica. Duas das distribuições habitualmente utilizadas são as distribuições triangular e beta, cujas expressões são dadas, respetivamente, por [16]:

$$tE = \frac{tO + tM + tP}{3} \quad (2.3)$$

$$tE = \frac{tO + 4tM + tP}{6} \quad (2.4)$$

Este tipo de estimativa de três pontos com uma distribuição específica fornece uma duração expectável e estabelece a faixa de incerteza sobre a mesma [16]. Por outro lado, recorrendo ao teorema do limite central, o PERT assume que a duração total de um projeto pode ser estatisticamente descrita por uma distribuição normal, sobretudo se o número de atividades no caminho crítico for elevado. A equação seguinte permite determinar a probabilidade de concluir um projeto antes de um período de tempo ( $T$ ) específico [27]:

$$P(X \leq T) = P\left(Z \leq \frac{T - \hat{\mu}_c}{\hat{\sigma}_c}\right) \quad (2.5)$$

Onde  $\hat{\mu}_c$  designa a estimativa da média da duração de um projeto e  $\hat{\sigma}_c$  o respetivo desvio padrão, ambos referentes ao caminho crítico identificado pela mesma lógica aplicada no CPM [27].

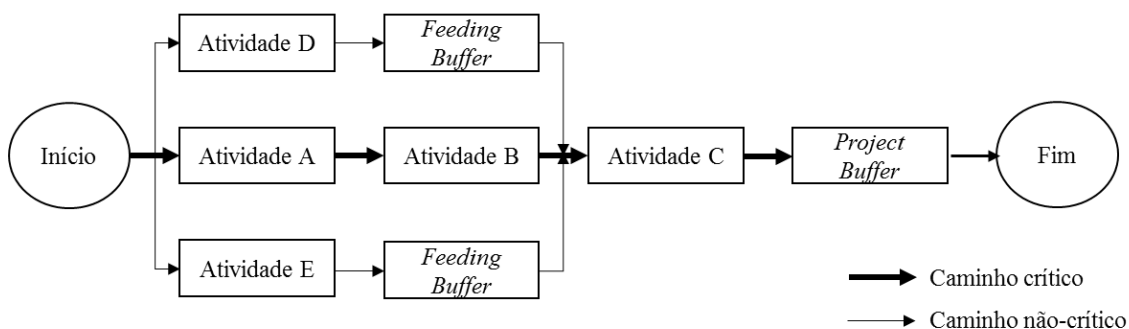
#### 2.2.3.1.4. Gestão de Projetos pela Cadeia Crítica

A Gestão de Projetos pela Cadeia Crítica (*Critical Chain Project Management* – CCPM) é uma técnica que surge com o objetivo de introduzir algumas mudanças estratégicas na forma como os projetos são habitualmente planeados, calendarizados e geridos [28]. Promovida por E. M. Goldratt, em 1997 (em [29]), a CCPM procura introduzir *buffers* (reservas temporais) no cronograma dos projetos de modo a aumentar a estabilidade e a probabilidade do cumprimento dos prazos dos mesmos. Este método considera os muitos efeitos ao nível da alocação, otimização e nivelamento de recursos e

ainda as incertezas na duração das atividades do caminho crítico definido através do CPM [16].

A cadeia crítica (*critical chain*) é constituída pelo conjunto de atividades que define a duração total de um projeto, considerando tanto as suas precedências como a necessidade de recursos para a sua execução. Assim, na CCPM é essencial assegurar a disponibilidade dos recursos da cadeia crítica, isto sem estar dependente de datas pré-estabelecidas. Para isso, por norma, são utilizadas reservas de recursos que, de maneira simplista, servem como alertas de atuação. Findo este processo, e tendo já estabelecido um cronograma viável com índices de confiança elevados, é então necessário agregar reservas temporais, quer no final do projeto (*project buffer*), quer durante a sua execução (*feeding buffer*) [28].

Os *buffers*, caracterizados por uma determinada duração, representam, basicamente, reservas temporais estrategicamente colocadas ao longo de um projeto, mas que, no fundo, não poderão traduzir a realização de qualquer trabalho. Em particular, o *project buffer* é colocado após a atividade final de um projeto, tendo como objetivo atuar como proteção (margem de segurança) contra alterações ocorridas nas durações estabelecidas para as atividades da cadeia crítica. No caso dos *feeding buffers*, estes são colocados no final das cadeias não críticas, na sua convergência com a cadeia crítica, tendo como objetivo atuar como proteção contra a variabilidade de atividades não críticas [28]. Na figura 2.8 está ilustrado um exemplo desta aplicação:



**Figura 2.8 – Exemplo de CCPM** (adaptado de [16, p. 178])

Apesar de similares, o conceito de *buffer* difere do conceito de folga, conceito esse já abordado na referência ao CPM. Embora ambos se refiram, genericamente, a um período de tempo em que as atividades podem sofrer atrasos sem que isso tenha um impacto negativo no cumprimento do calendário de um projeto, enquanto as folgas são



calculadas pelas diferenças entre a data de início e de conclusão, os *buffers* são produzidos de acordo com a variabilidade admitida nas atividades. Além disso, as folgas podem ser utilizadas ou não, enquanto os *buffers* são para serem de facto utilizados [28].

A gestão dos *buffers* é o principal meio de controlo do desempenho do cronograma de um projeto, pois permite verificar a necessidade de recalendarização através do consumo dos mesmos. Em vez de gerir a folga total dos caminhos da rede, a CCPM foca-se na gestão das durações restantes dos *buffers* em relação às durações restantes das cadeias de atividades. Como consequência, o correto dimensionamento de cada *buffer* surge como um dos principais desafios da CCPM. Para tal, há que considerar a incerteza na duração do conjunto de atividades que levam aos respetivos *buffers* e ainda a probabilidade desejada para concluir um plano de trabalhos específico. Não obstante esta condição, a CCPM apresenta-se como uma ferramenta promissora para o desenvolvimento de modelos de projeto quando aplicada eficazmente [16] [28].

### 2.2.3.2. Identificação das Incertezas

Finda a fase de desenvolvimento do modelo de projeto através da criação da respetiva linha de base do cronograma, o passo seguinte num processo geral de execução de uma análise de risco é identificar as incertezas desse mesmo modelo, ou seja, os riscos.

Embora a abordagem determinística seja importante numa primeira fase na análise de risco, existem algumas desvantagens com a sua utilização, tais como [17]:

- Considera apenas alguns resultados discretos, ignorando bastantes outros;
- Atribui um peso igual para cada resultado, o que significa que não é feita qualquer tentativa para avaliar as probabilidades;
- A interdependência entre as variáveis de entrada e o seu impacto nos resultados são ignorados, o que resulta numa simplificação excessiva do modelo desenvolvido e na redução da sua precisão.

Como se pôde aferir na secção 2.2.3.1.1, o CPM é o principal bloco de construção de um modelo de projeto, mas a sua grande limitação é o facto de representar apenas um plano do mesmo. Com este método, as variáveis de entrada assumidas no modelo de projeto são tidas como certas, ou seja, são determinísticas. No entanto, pode-se não saber quais os valores que as variáveis de entrada irão assumir, logo estas são tidas como

incertas, ou seja, são estocásticas. Quando as variáveis de entrada são tidas como incertas, é necessário descrever a natureza dessa mesma incerteza. Isso é possível através das funções de distribuição de probabilidade (já referenciadas na figura 2.6 da secção 2.2.2.2), as quais determinarão tanto a faixa de valores que as variáveis de entrada podem assumir (de um valor mínimo a um valor máximo) como a probabilidade de ocorrência de cada valor dentro dessa mesma faixa. O PERT já consegue incluir, por exemplo, probabilidades de cumprimento dos prazos de um projeto. Pôde-se verificar na secção 2.2.3.1.3 que esta técnica utiliza funções de distribuição de probabilidade para estimar o tempo de duração das atividades de um projeto. Esta é uma das principais razões pela qual o PERT e o CPM são utilizados em conjunto. No fundo, procede-se à utilização de métodos que transformem os modelos determinístico (CPM) em modelos estocásticos (PERT), ou seja, métodos que tenham em consideração a propagação da incerteza por forma a ter um cronograma mais dinâmico [17].

Contudo, existe uma larga gama de valores que não é considerada pelo PERT ao longo de uma faixa de distribuição. Além disso, consoante o modelo de projeto que se pretende analisar, existem diversas funções de distribuição de probabilidade não contempladas por esta técnica e que podem assumir um papel bastante relevante na modelação do problema. Mais ainda, a incerteza de um modelo de projeto pode não estar somente ao nível da duração das atividades, o único foco do PERT, mas em muitas outras variáveis, como a data de início do projeto, o custo dos recursos, as unidades utilizadas de um determinado material, etc. Todos estes focos de incerteza têm características próprias que podem ser ajustadas por funções de distribuição de probabilidade específicas. Uma panóplia de diferentes distribuições e respetiva descrição pode ser consultada em [17].

Além de certas ou incertas, as variáveis de entrada de um modelo de projeto sujeito a análise de risco podem também ser dependentes ou independentes. Uma variável independente é aquela que não pode ser afetada por qualquer outra variável do modelo. Por outro lado, uma variável dependente é determinada, parcial ou totalmente, por uma ou mais variáveis do modelo. Assim, aquando da identificação das variáveis de entrada tidas como incertas, pode-se decidir se estas estão ou não correlacionadas, algo que o PERT, por exemplo, também não admite [17] [27]. Isto permite estabelecer um modelo de projeto lógico, pois está nele incluído uma medida de associação não-linear entre variáveis tidas como incertas (aleatórias). Esta mesma medida pode ser representada pelo

coeficiente de Spearman,  $\rho$ , uma medida tradicional que traduz o grau de relação não-linear entre duas variáveis e que se situa no intervalo  $[-1, 1]$ . A correlação é 1 no caso de uma clara relação não-linear positiva, -1 no caso de uma clara relação não-linear negativa e 0 quando não há qualquer correlação entre variáveis. Quanto mais próximo o coeficiente estiver de -1 ou 1, mais forte será a correlação entre essas duas variáveis [30]. Como regra empírica, estabelece-se que o coeficiente de correlação espelha uma forte relação entre variáveis  $(X, Y)$  se  $|\rho(X, Y)| \geq 0,70$  [31].

Por último, estando já identificadas as variáveis de entrada e tendo sido atribuídas as funções de distribuição de probabilidade e respetivas correlações, há-que definir as variáveis de saída. Estas correspondem aos resultados gerados pela análise de risco, os quais representam, genericamente, as distribuições de probabilidade de valores incertos, ou seja, que possam vir a ocorrer. Note-se que qualquer variável de saída será sempre tida como incerta, uma vez que é gerada a partir de valores igualmente incertos [17].

Em seguida são apresentadas, sucintamente, quatro técnicas para identificar as incertezas de um modelo de projeto.

### **1. Categorias de Risco**

As categorias de risco permitem aplicar um determinado risco a um determinado campo de um conjunto de atividades e/ou recursos de um projeto. Esse risco é definido por uma distribuição de probabilidade que é associada a um campo específico de um e/ou outro conjunto (duração, data de início e de conclusão das atividades, custo e disponibilidade de um recurso, etc.), à qual é aplicada um intervalo de mínimo e máximo para todas as estimativas correspondentes. Esta ferramenta é a mais trivial na modelação do risco, sendo as distribuições de probabilidade triangular, pert, uniforme, normal e trigon as mais comumente utilizadas [17].

### **2. Tabela de Entrada de Parâmetros**

Analogamente às categorias de risco, a tabela de entrada de parâmetros permite aplicar um determinado risco a um determinado campo de um conjunto de atividades e/ou recursos de um projeto. A diferença está no facto de a tabela de entrada de parâmetros ser incluída no próprio modelo de projeto com o objetivo de dar ao gestor de projeto a possibilidade de alternar manualmente os valores de um determinado campo consoante a necessidade. Além disso, esta ferramenta dá também a possibilidade de incluir diferentes

funções de distribuição de probabilidade no modelo de projeto, sendo possível alterar diretamente na tabela de entrada de parâmetros o valor dos argumentos que definem essas mesmas funções [17].

### **3. Ramificação Probabilística**

A ramificação probabilística permite que um projeto se ramifique de uma atividade a qualquer número de outras atividades sucessoras, sendo que cada grupo de atividades que pode ser ramificado tem um valor de probabilidade específico. Por exemplo, depois de concluída uma determinada atividade, denominada de A, pode haver uma probabilidade de 15% de que a atividade B é a sucessora de A e uma probabilidade de 85% de que a atividade C é a sucessora de A. Isto permite atribuir uma probabilidade de execução de diferentes atividades sucessoras quando a atividade precedente é a mesma [17].

### **4. Calendários Probabilísticos**

Os calendários probabilísticos permitem a introdução de probabilidades referentes a dias que não são de trabalho. Isso tem em consideração determinadas condições e/ou eventos que podem afetar os resultados de um projeto, como, por exemplo, condições meteorológicas durante certas épocas do ano. Este método permite modelar possíveis circunstâncias que afetam os calendários de um projeto, associando percentagens de não ocorrência de trabalho a datas específicas e/ou a intervalos de datas [17].

#### **2.2.3.3. Análise do Modelo via Simulação**

Uma vez concluída a identificação das incertezas, o modelo pode ser finalmente analisado. Para realizar esta análise existem duas formas. A primeira forma consiste numa abordagem analítica, a qual requer que todas as distribuições de probabilidade definidas para as variáveis de entrada sejam descritas matematicamente. Com esta abordagem, as equações que descrevem a incerteza são combinadas de modo a gerar outra equação que descreve a distribuição de resultados possíveis. Porém, descrever distribuições por via analítica não é uma tarefa simples, sobretudo quando se tem um modelo de elevada complexidade. É por isso que habitualmente se opta pela segunda abordagem, denominada de simulação [16] [17].

Resumidamente, uma simulação utiliza um modelo que converte a incerteza no potencial impacto nos objetivos globais de um projeto [16]. Essa abordagem baseia-se na capacidade computacional de realizar rapidamente uma grande quantidade de cálculos, analisando os problemas em causa através do uso repetido de um grande número de iterações. Por outras palavras, uma simulação constitui uma ferramenta onde a distribuição de possíveis resultados é gerada ordenando a um computador que calcule o modelo de projeto repetidamente, onde em cada recálculo são utilizados diferentes conjuntos aleatórios de valores de acordo com as distribuições de probabilidade definidas para as variáveis de entrada tidas como incertas. No fundo, um computador testa todas as combinações válidas de variáveis de entrada com o propósito de simular todos os possíveis resultados, o que representa, de modo geral, a realização de um conjunto de análises de sensibilidade no modelo de projeto de uma só vez. Para isso é tipicamente utilizada a simulação de Monte Carlo [16] [17].

#### **2.2.3.3.1. Simulação de Monte Carlo**

A simulação de Monte Carlo é a técnica de simulação mais comum na análise de risco quantitativa [16]. O termo Monte Carlo surgiu durante a Segunda Guerra Mundial em sequência do desenvolvimento da bomba atômica, tendo sido adotado como código para a simulação de problemas associados a essa ação. Desde então que esta técnica é aplicada numa grande variedade de problemas complexos que envolvem incerteza [17]. Como exemplo, Hulett & Associates, uma afamada empresa de consultoria de gestão de projetos, recorre insistentemente a simulações de Monte Carlo numa grande diversidade de projetos de organizações como a Samsung, a Petrobras e a NASA. Esses e outros projetos podem ser consultados em [32].

A simulação de Monte Carlo é considerada um método de amostragem pois as variáveis de entrada são geradas aleatoriamente a partir de distribuições de probabilidade [33]. Por conseguinte, a amostragem designa o processo pelo qual os valores são aleatoriamente retirados das distribuições de probabilidade definidas para as variáveis de entrada. Numa simulação, a amostragem é efetuada repetidamente a cada iteração com uma amostra a ser retirada de cada distribuição de probabilidade. Com iterações suficientes, os valores amostrados ficam distribuídos de uma maneira que aproxime a distribuição de probabilidade da respetiva variável de entrada. Assim sendo, é importante

definir qual o número de iterações necessárias para recriar de forma apropriada uma distribuição de dados de entrada através do processo de amostragem [17]. Naturalmente que, aquando da simulação, quanto maior for o número de iterações melhor será a aproximação obtida, já que resultados precisos para a distribuição de uma variável de saída dependem de uma amostragem completa de distribuições de variáveis de entrada. Contudo, há que também ter em atenção o impacto que isso tem no tempo de simulação [27] [34].

Segundo [33], uma simulação de Monte Carlo envolve os seguintes passos:

1. Criação de um modelo paramétrico:  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;
2. Geração de um conjunto de entradas aleatórias:  $xi_1, xi_2, \dots, xi_q$ ;
3. Avaliar o modelo e guardar os resultados como  $y_i$ ;
4. Repetir os passos 2 e 3 para  $i = 1$  até  $n$ ;
5. Analisar os resultados.

Dada esta sequência, é perceptível que a simulação de Monte Carlo surge como uma ferramenta de análise de risco quantitativa estocástica. Apesar de o PERT ser igualmente uma ferramenta estocástica, e o recurso à simulação computadorizada ser um pouco exigente ao nível da modelação e por vezes morosa na reprodução de resultados, esta técnica tem prevalecido como escolha para redes de maior dimensão e complexidade. Ela produz resultados mais próximos da realidade do que as estimativas provenientes do PERT, já que através dela todos os caminhos da rede de um projeto são considerados [35] [36].

A simulação de Monte Carlo apresenta as seguintes vantagens [17] [27]:

- **Resultados probabilísticos** – revelam aquilo que pode ocorrer no futuro como também a probabilidade de ocorrência de cada resultado;
- **Resultados gráficos** – geração de diferentes gráficos de diferentes resultados e das suas probabilidades de ocorrência;
- **Análise de sensibilidade** – permite verificar quais as variáveis de entrada que têm o maior efeito nos resultados finais (através de gráficos de tornado, por exemplo);
- **Análise de cenários** – proporciona a visualização dos efeitos de diferentes cenários através dos diferentes valores assumidos pelas variáveis de entrada quando certos resultados ocorreram;

- **Correlação de *inputs*** – dada esta possibilidade, ao contrário das redes PERT, é possível modelar relações interdependentes entre as variáveis de entrada, o que aumenta a precisão do modelo e permite representar essa ligação.

#### **2.2.3.4. Tomada de Decisão**

A tomada de decisão é fruto da análise dos resultados provenientes das simulações de Monte Carlo. Como já foi referido, estes resultados são apresentados na forma de distribuição de probabilidade, devendo, portanto, ser alvo de interpretação por parte dos gestores de projeto e/ou por outras entidades responsáveis pela tomada de decisão.

Nesta fase, as distribuições de probabilidade associadas às variáveis de saída oferecem uma visão global de todos os resultados possíveis. Contrariamente à abordagem determinística, que considera apenas os valores esperados e que os compara a valores de referência sem considerar qualquer incerteza, o facto de ter uma distribuição de probabilidade para cada variável de saída permite obter uma gama diversificada de resultados possíveis e respetivas probabilidades de ocorrência. Assim, em vez de simplesmente se comparar resultados desejáveis com resultados indesejáveis, pode-se verificar que existem resultados que são mais prováveis que outros, o que resulta numa avaliação ponderada dados os pesos distintos que cada um deles possui [17].

Apesar da representação gráfica proveniente das simulações de Monte Carlo tornar o processo de tomada de decisão mais acessível, ao permitir a visualização das probabilidades e a compreensão dos riscos envolvidos, os resultados obtidos devem ser interpretados por vários elementos das equipas de projeto. Uma vez que cada indivíduo tem muitas vezes preferências díspares no que toca à decisão – há quem atribua maior relevância à variável tempo do que à variável custo, por exemplo, ou vice-versa –, os mesmos resultados, quando analisados individualmente, podem ser interpretados de formas muito diferentes, o que levaria a tomar decisões igualmente muito diferentes. Como consequência, há-que reunir e debater em conjunto as várias opiniões individuais no sentido de chegar a uma solução comum. Para isso, existem indicadores específicos que podem ser analisados.

#### 2.2.3.4.1. Indicadores estatísticos

As distribuições de probabilidade que representam as variáveis de um modelo de análise de risco são caracterizadas por diversos parâmetros. De todos esses parâmetros existem alguns que são mais frequentemente estimados e consequentemente utilizados como base para uma tomada de decisão bem fundamentada. Em seguida são apresentados os indicadores estatísticos que habitualmente têm maior relevância numa interpretação de resultados [17] [31]:

- **Máximo** – valor máximo assumido pela distribuição de probabilidade;
- **Mínimo** – valor mínimo assumido pela distribuição de probabilidade;
- **Amplitude** – a diferença entre valor máximo e o valor mínimo do conjunto de dados;
- **Média** – valor que indica o ponto onde se concentram os valores de uma distribuição; é a soma de todos os valores de um conjunto dividida pelo número total de valores desse mesmo conjunto;
- **Moda** – valor da distribuição mais frequente, isto é, que ocorre com maior probabilidade;
- **Mediana** – valor que indica o centro da distribuição de probabilidade;
- **Variância** – medida de dispersão que indica o quão difundidos estão os valores numa distribuição face à média; é calculada como uma média dos desvios quadrados em torno da média;
- **Desvio padrão** – medida de dispersão que, analogamente à variância, indica o quão dispersos estão os valores numa distribuição face à média; é igual à raiz quadrada da variância;
- **Assimetria** – medida de formato de uma distribuição que indica o quanto esta se afasta de um formato simétrico. Distribuições assimétricas possuem valores diferentes nas margens esquerda e direita do valor mais provável, o que resulta em diferentes formatos da função de distribuição de probabilidade. Enquanto uma assimetria nula indica, naturalmente, uma distribuição simétrica, uma assimetria negativa indica que a distribuição é assimétrica à esquerda e uma assimetria positiva indica que a distribuição é assimétrica à direita;



- **Curtose (achatamento)** – medida do formato da distribuição que indica o quanto esta é esticada ou plana (achatada). Basicamente, quanto maior o seu valor, mais esticada ou plana será a distribuição;
- **Percentil (P)** – incremento nos valores de um conjunto de dados. Os percentis são pontos estabelecidos em cem intervalos regulares a partir de uma função de distribuição de probabilidade cumulativa. Ou seja, os percentis dividem os dados em 100 partes iguais, cada um contendo um por cento dos valores totais. O percentil 60 (P60), por exemplo, é o valor no conjunto de dados para o qual 60% dos valores estão abaixo e 40% estão acima.

#### 2.2.3.4.2. Indicadores de sensibilidade

Além dos indicadores estatísticos existem ainda outros indicadores que permitem tirar conclusões acerca do comportamento e sensibilidade das várias atividades que constituem um projeto. Estes indicadores podem ser utilizados pelos gestores de projeto para distinguir entre as várias atividades aquelas que são um maior alvo de risco, ou seja, que são mais críticas para os resultados obtidos, a fim de melhor compreender o impacto das mesmas nos objetivos gerais dos projetos. Em seguida são apresentados os indicadores de sensibilidade que habitualmente têm maior relevância numa interpretação de resultados [17] [30]:

- **Índice crítico (IC)** – representa a percentagem de tempo durante uma simulação em que, a cada iteração, uma atividade é incluída no caminho crítico de um projeto. Este indicador permite avaliar a importância de cada atividade, onde valores mais elevados indicam uma maior probabilidade de haver atraso no projeto causado por essa mesma atividade.
- **Índice de significância (IS)** – a fim de refletir a importância relativa entre as atividades de um projeto, este indicador é calculado da seguinte forma:

$$IS = E \left( \frac{DA \times DP}{(DA + FA) \times E(DP)} \right) \quad (2.6)$$

Com  $DA$ ,  $DP$  e  $FA$  a designarem a duração da atividade, a duração do projeto e a folga da atividade, respetivamente, sendo que  $E(x)$  indica o valor esperado de  $x$ . Em vez de expressar a criticidade de uma atividade através do conceito de

probabilidade, tal como o IC, o IS tem como objetivo expor a importância de atividades individuais na duração total do projeto.

- **Índice de sensibilidade (ISE)** – proposto em [16], este indicador combina os desvios padrão ( $\sigma$ ) da duração de um projeto e das suas atividades com o IC, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$ISE = \frac{\sigma(DA) \times IC}{\sigma(DP)} \quad (2.7)$$

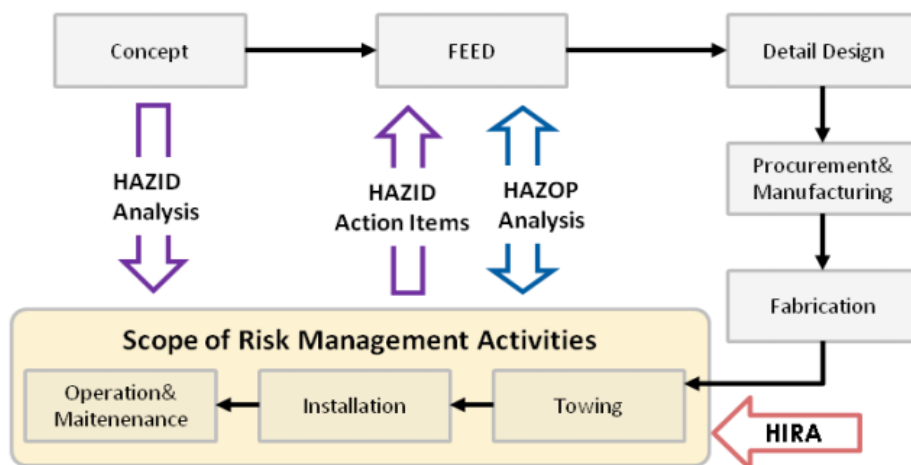
- **Índice de correlação (ICO)** – representa a importância relativa de uma determinada atividade de forma mais intuitiva e calcula a porção de incerteza da duração de um projeto com origem na incerteza dessa mesma atividade. É dado pelo coeficiente de correlação entre a duração de uma atividade e a duração total de um projeto. Um processo de medir este indicador é através do coeficiente de correlação  $\rho$ , o mesmo que é utilizado no processo de identificação das incertezas abordado na secção 2.2.3.2. Este indicador é analiticamente expresso por:

$$ICO = \frac{\sum(DA - \overline{DA}) \times (DPS - \overline{DPS})}{\sqrt{\sum(DA - \overline{DA})^2 \times (DPS - \overline{DPS})^2}} \quad (2.8)$$

Com  $\overline{DA}$ ,  $DPS$  e  $\overline{DPS}$  a designarem a média da duração da atividade, a duração do projeto simulada e a média da duração do projeto simulada, respetivamente.

## 2.2.4. Análise de Risco no Projeto WindFloat 1

Na secção 2.1.3 constatam-se as vantagens existentes na implementação de parques eólicos *offshore* em Portugal. Foi na sequência do potencial existente no país que se deu início ao projeto WF 1 através do desenvolvimento de um primeiro modelo. Por se tratar de uma fase de demonstração, houveram inúmeros desafios no desenvolvimento desse projeto, em parte devido ao à falta de *know-how* em Portugal em projetos dessa natureza. Assim sendo, foi necessário desenvolver um processo de análise do risco capaz de mitigar as dificuldades e de maximizar as oportunidades desde o início [1]. Na figura 2.9 está esquematizado o processo de análise de risco praticado no projeto WF 1:



**Figura 2.9 – Processo de análise de risco praticado no projeto WF 1** (retirado de [1, p. 14])

Como se pode confirmar pelo esquema apresentado na figura 2.9, as metodologias utilizadas no processo de análise de risco praticado no projeto WF 1 foram:

- HAZID (*Hazard Identification Study*);
- HAZOP (*Hazard and Operability Study*);
- HIRA (*Hazard Identification and Risk Assessment*).

A HAZID é uma ferramenta para identificação dos riscos, sendo utilizada numa fase embrionária de um projeto assim que a primeira documentação está pronta. Dados meteorológicos, zona de instalação, etc., são fontes de risco externas que se pretendem analisar. A HAZOP – referenciada na secção 2.2.2.1 como uma das metodologias determinísticas mais utilizadas num processo de análise de risco – permite identificar e documentar riscos de modo intuitivo. Esta metodologia envolve uma análise sistemática da documentação que caracteriza o projeto em estudo. O estudo é efetuado por uma equipa multidisciplinar que avalia analiticamente potenciais desvios daquilo que está projetado. A HIRA é uma técnica utilizada pela equipa de projeto com o objetivo de descobrir os riscos, a frequência com que podem ocorrer e o seu impacto. É uma técnica de avaliação que permite antever os cenários possíveis, poupar tempo e recursos [21].

No caso concreto do projeto WF 1, como se pode observar na figura 2.9, o processo de análise de risco centrou-se, em primeiro lugar, na fase de conceção do projeto e na fase FEED (*Front-End Engineering Design*), marcada maioritariamente pela seleção do aerogerador e pela preparação do investimento final. Em segundo lugar, o processo de análise de risco centrou-se nas atividades específicas de implementação do projeto,

nomeadamente no reboque Lisnave-Aguçadoura, na instalação *offshore* e na operação e manutenção do dispositivo [1].

## 3. Formulação do Problema

Neste capítulo apresenta-se o problema que a presente dissertação procura estudar. Na secção 3.1 faz-se a descrição do projeto em estudo através de uma referência geral às características do mesmo e às fases de execução que o compõem. Na secção 3.2 procura-se explicar qual o âmbito da análise de risco, com particular destaque para o foco da análise e para a proposta metodológica a seguir.

### 3.1. Descrição do Projeto

#### 3.1.1. Visão Geral

A presente dissertação incide sobre a fase pré-comercial do projeto WFA, a qual sucede à fase de demonstração anteriormente apresentada na secção 2.1.3. Este projeto visa a instalação e operação, a partir de 2018 e por um período estimado de 25 anos, de um parque eólico *offshore* ao largo da costa da cidade de Viana do Castelo. O investimento total está avaliado em sensivelmente 100 M €.

O parque eólico, composto por três dispositivos WF (WFA 1, WFA 2 e WFA 3), estará localizado a uma distância de cerca de 20 km da orla litoral onde o mar tem uma profundidade de aproximadamente 100 m. Cada dispositivo terá uma potência nominal de 8,4 MW, o que representa uma capacidade total para o parque eólico de 25 MW. Tal como na fase antecedente, também neste projeto não haverá necessidade de ter uma subestação *offshore* dada a possibilidade de ligação em terra à rede de distribuição a menos de 20 m da costa, neste caso à tensão de 60 kV. O projeto será conduzido pelo

consórcio WindPlus, liderado pela EDP Renováveis e com participações da Repsol, Mitsubishi Corporation, Chyoda Corporation e Thrust Energy.

Analogamente ao protótipo desenvolvido no projeto de demonstração, cada dispositivo WF será constituído por dois componentes principais: uma plataforma flutuante semi-submersível, estabilizada por três colunas e um sistema de amarração assimétrico, e um aerogerador, de eixo horizontal, diretamente posicionado numa das colunas de estabilização da plataforma. As principais diferenças face ao modelo original estão na maior dimensão e na consequente maior capacidade de cada dispositivo, o que permite reduzir significativamente o custo por MW instalado. O conceito foi otimizado com base nos conhecimentos adquiridos com o projeto pioneiro, sendo que um dos progressos foi no sistema de amarração, que será reduzido para três linhas de amarração por plataforma.

### 3.1.2. Fases de Execução

Este projeto está dividido em três fases principais, tal como ilustra a figura 3.1:



**Figura 3.1 – Diagrama das fases do projeto WFA**

#### 1. Fabrico das Plataformas

O fabrico das plataformas decorrerá num estaleiro naval (estaleiro da Lisnave) onde as estruturas finais serão montadas. Alguns componentes das estruturas poderão ser pré-fabricados permitindo otimizar recursos no fabrico. Uma vez montadas as estruturas primárias, cada plataforma será concluída com as estruturas auxiliares.

#### 2. Montagem dos Aerogeradores

Assim que o fabrico de cada uma das plataformas estiver concluído, estas serão rebocadas para o porto marítimo de águas profundas de Sines. É neste local que se cumprirá a montagem dos aerogeradores nas respetivas plataformas, o que corresponde à segunda fase do projeto. Esta mudança de local é necessária devido ao calado das estruturas, uma vez montados os aerogeradores. As plataformas serão transportadas

flutuando individualmente até ao porto de Sines com o auxílio de rebocadores locais. O tempo de reboque estimado para cada uma delas é de 24 h, incluindo a entrada no porto. Esta operação carece de condições meteorológicas favoráveis, em particular de altura significativa de ondas ( $H_s$ ), pelo que se terá eventualmente de aguardar até que estejam reunidas as condições necessárias para a poder realizar.

No caso concreto dos aerogeradores, estes serão fornecidos por um fabricante sediado na União Europeia, com os diversos componentes (torres, *nacelles* e pás) a serem transportados para o porto de Sines, onde serão montados bloco a bloco nas respetivas estruturas. O seu fornecimento será efetuado numa data previamente estabelecida de modo a conciliar a chegada das plataformas com o processo de montagem. A montagem, por sua vez, será executada por uma grua com uma capacidade de levantamento de 400 t a uma altura de 100 m, sendo que, para isso, também será necessário reunir condições meteorológicas favoráveis, em particular de velocidade média de vento ( $V$ ). A grua será ainda utilizada para descarregar os componentes dos aerogeradores dos navios responsáveis pelo seu transporte, mas essa operação não terá qualquer restrição de vento. Este recurso terá um período de atividade ininterrupto de 12 h/dia, todos os dias da semana (de 2<sup>a</sup> feira a domingo), com horas de entrada em serviço variáveis.

### 3. Instalação *Offshore*

Após a montagem dos aerogeradores nas respetivas plataformas, os dispositivos WF serão transportados um a um para o local de implantação do parque eólico, no qual já terá sido previamente instalado por um navio AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*) (navio 1) o sistema de âncoras e linhas de amarração. O transporte será realizado por dois rebocadores de alto mar (rebocador 1 e rebocador 2), sendo que a duração individual de cada operação será de seis dias, dependendo das condições meteorológicas, pelo que o seu início deverá ser ajustado conforme a previsão do estado de mar. A preparação e saída dos cais do porto de Sines, onde estarão atracados os três dispositivos, terá ainda o apoio de um rebocador auxiliar local. O reboque dos WF será então efetuado paralelamente à costa portuguesa, no sentido sul-norte, com destino à zona costeira de Viana do Castelo.

Uma vez chegados ao local de instalação, os rebocadores posicionarão os dispositivos WF através de um sistema de posicionamento dinâmico. Um segundo navio (navio 2) poderá então conectar as amarrações pré-instaladas a cada plataforma (*hook-up*) e fazer a instalação dos respetivos cabos elétricos. O navio 1 será desmobilizado

aquando da conclusão da instalação do último trio de linhas de amarração, o que significa que poderão haver atividades em paralelo. Esta corresponde à terceira e última fase do projeto e toda ela requer condições meteorológicas favoráveis ( $H_s$  e  $V$ ), já que todo o processo de instalação é efetuado em ambiente *offshore*. Tanto os rebocadores como os navios terão um período de atividade ininterrupto de 24 h/dia durante toda a semana (de 2ª feira a domingo).

## **3.2. Âmbito da Análise de Risco**

### **3.2.1. Fase de Demonstração vs. Fase Pré-Comercial**

A fase pré-comercial do projeto WFA, que é o objeto em análise nesta dissertação, é substancialmente diferente em relação à fase de demonstração que a antecede. A isso se deve sobretudo o facto de estarem em causa não um, mas três dispositivos WF. Ao contrário da primeira fase, esta segunda fase já se aproxima de uma situação comercial com múltiplos dispositivos, o que permitirá adquirir os conhecimentos necessários de modo a conseguir escalar este projeto para projetos com uma maior dimensão. Além disso, o processo de implementação do projeto em si tem algumas particularidades que o projeto referente ao protótipo não teve, o que também permitirá antever algumas dificuldades do ponto de vista da gestão do risco quando existem vários dispositivos.

Como referido na secção 3.1.2, o processo de fabrico das plataformas e subsequente montagem dos aerogeradores terá lugar em dois locais distintos. Enquanto na fase de demonstração todo esse processo foi realizado somente num local (estaleiro da Lisnave), nesta nova fase semelhante situação não se irá repetir. Isso resulta na necessidade de mais uma deslocação via marítima comparativamente ao primeiro caso. E uma vez que atualmente se têm três dispositivos, ter-se-á um total de três deslocações adicionais, o que implica um maior risco para o projeto no que toca à sua duração devido às restrições meteorológicas associadas. Além disso, ter de considerar mais um local de trabalho e ter a necessidade de gerir todas as operações de amarração leva a um processo logístico mais complexo. Assim, aliado ao risco de derrapagem da duração do projeto está ainda o risco de derrapagem dos custos do mesmo, visto que estão mais recursos incluídos.

Somado a isto, neste projeto há também a necessidade de gerir o sequenciamento do processo de montagem dos aerogeradores em paralelo com o processo de instalação



*offshore*. No projeto WF 1, o protótipo, depois de fabricado, foi rebocado para o seu local de instalação assim que houve uma janela temporal favorável. Nesta segunda fase, devido ao número de dispositivos e à restrição de recursos, é necessário gerir esta ação com mais algum equilíbrio. Idealmente, logo que cada dispositivo estivesse concluído e pronto para ser rebocado para o local de comissionamento, isso deveria confirmar-se de imediato. No entanto, devido mais uma vez às condições meteorológicas eventualmente limitativas, esta ação pode ser alvo de atrasos consideráveis, o que poderá comprometer a data de conclusão do projeto e dar origem a um considerável aumento dos custos, pois todos os recursos têm um custo diário de utilização, seja ela efetiva ou não.

A influência das condições meteorológicas na instalação *offshore* verifica-se ainda numa etapa anterior aquando da instalação do sistema de âncoras e linhas de amarração. Pretende-se que esta ação seja finalizada o mais levemente possível de modo a rentabilizar os recursos alocados. Sabendo que o *hook-up* de cada WF só poderá ser consumado depois de instalado o respetivo trio de linhas de amarração, pretende-se que a sua instalação não sofra um atraso que leve à permanência prolongada dos dispositivos no porto de Sines. Isto não se verificou no projeto de demonstração, pois sendo apenas um dispositivo houve uma muito maior flexibilidade na gestão do processo de reboque e consequente instalação. Caso esta etapa sofra um atraso muito relevante, isso envolverá custos adicionais para os navios e para os cais do porto de Sines onde os dispositivos WF estarão atracados.

### 3.2.2. Foco de Análise

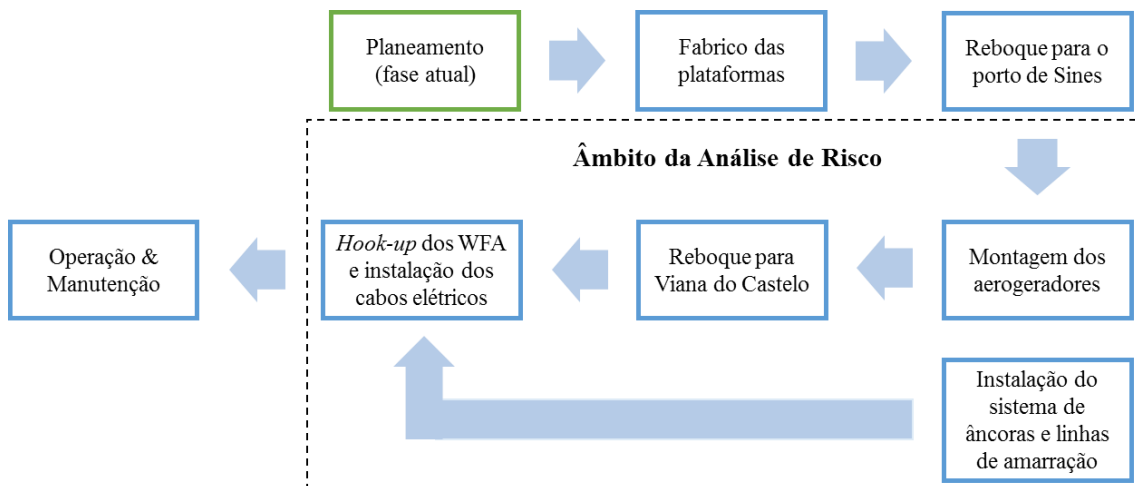
Pretende-se nesta dissertação avaliar o risco do ponto de vista da gestão do projeto ao nível da sua duração. Uma vez que as três fases terão lugar em diferentes locais e por possuírem características tão distintas, o principal objetivo é fazer a gestão/análise das interfaces entre as mesmas, ou seja, a gestão/análise do sequenciamento e inter-relacionamento entre as várias atividades que as compõem. Em vez de uma estrutura EPCI (*Engineering, Procurement, Construction and Installation*), neste projeto ter-se-á um contrato diferente para cada uma das três fases, daí a necessidade de gerir/analisar as interfaces entre si.

Através da análise de risco aplicada à calendarização do projeto, será possível ter um maior controlo sobre as durações das atividades e os respetivos atrasos de modo a

otimizar a duração total do projeto. Isto é, ter-se-á a capacidade de calendarizar as atividades para a melhor altura do ano, garantindo tempo suficiente para eventuais atrasos devido às condições ambientais que se possam propagar ao longo do tempo. Como consequência, isso permitirá minimizar a utilização dos recursos, o que significa minorar os custos associados. Para isso, procurar-se-á verificar quais as atividades que potencialmente geram mais atraso no projeto e quais é que podem ser reordenadas entre si no caso de não poderem ser executadas devido a limitações meteorológicas. A variável meteorológica possui um papel preponderante no tempo de execução do projeto WFA ao assumir-se como a sua principal fonte de incerteza, e, por isso, é o principal foco de análise desta dissertação.

Apesar de o projeto WFA estar dividido em três fases principais, todas elas sujeitas a estados de incerteza, a primeira fase, referente ao fabrico das plataformas, é aquela que apresenta o menor grau de risco, pois todo o processo é efetuado em terra, em ambiente controlado, e sem requerer condições meteorológicas muito restritas. Logo, esta fase não será incluída no processo de análise de risco. Assume-se apenas que as três plataformas irão chegar ao porto de Sines num período pré-estabelecido e o processo de análise de risco será executado a partir desse momento.

A figura 3.2 sumariza o âmbito da análise de risco da presente dissertação:



**Figura 3.2– Âmbito da análise de risco**

### 3.2.2.1. Análise de Cenários

Com o propósito de avaliar a calendarização do projeto, no sentido de identificar quais os melhores períodos para realizar as várias atividades que o constituem por forma a obter a melhor otimização possível, ter-se-á, como base para o processo de análise de risco, um conjunto de dados históricos referentes às condições meteorológicas registadas nos locais onde se irá proceder à montagem dos aerogeradores e à instalação *offshore*. Os dados históricos são compostos por séries temporais com registos hora-a-hora, sendo que as variáveis em análise serão aquelas que terão influência direta nestes mesmos processos, como referido na secção 3.1.2 ( $Hs$  e  $V$ ).

Para a fase referente à montagem dos aerogeradores será utilizado um espectro de 20 anos de dados históricos (1995-2014), do qual será analisada a variável  $V$ . Para a fase referente à instalação *offshore* será utilizado um espectro de 64 anos de dados históricos (1950-2013), do qual serão analisadas as variáveis  $Hs$  e  $V$ . O ajuste das distribuições do conjunto de dados relativo a estas variáveis está representado no Anexo A.

Através do conjunto de dados enunciado pretende-se determinar o *weather downtime* (WDT) expectável para o projeto. Esta variável designa o período de tempo em que um ou mais recursos não poderão operar por não estarem reunidas as condições meteorológicas necessárias à realização das atividades conforme as respetivas especificações de  $Hs$  e  $V$ . Por outras palavras, o WDT corresponde, basicamente, ao tempo de atraso que cada atividade irá ter devido a condições meteorológicas adversas que impossibilitam a sua realização. Ou seja, é o tempo que cada atividade leva desde o seu suposto início até ao seu início efetivo.

Uma vez que o WDT terá um impacto significativo na duração do projeto, torna-se imperativo recorrer a métodos que permitam contornar ou, pelo menos, minimizar esse facto. Assim, com base nas características e nas interdependências das várias atividades sujeitas às limitações de  $Hs$  e  $V$ , pretende-se adotar uma estratégia de mudança do ordenamento inicial das atividades tendo em conta o cenário em que o projeto se irá encontrar. Essa estratégia consiste em realizar atividades que originalmente não surgem no sequenciamento delineado para o plano base do projeto. Isto é, sempre que após a conclusão de uma determinada atividade a atividade sucessora não possa ser realizada por não estarem reunidas as condições meteorológicas necessárias, a atividade que originalmente surgiria após o término desta é antecipada, passando, assim, a ter prioridade

sobre a antecessora. Isto acontece sempre que não haja uma precedência entre atividades que tenha forçosamente de ser respeitada e que não permita assumir um novo cenário para o projeto. Com isto, conseguir-se-á ladear a existência de WDT para a atividade que não pode ser realizada, que, no fundo, corresponderia a um período de interrupção que atrasaria o desenvolvimento do projeto, procedendo à antecipação e consequente realização da atividade seguinte através do seu reordenamento. Isso permitirá otimizar a duração total do projeto, pois conseguir-se-á uma maior rentabilidade dos recursos disponíveis.

Dado isto, os recursos do projeto WFA cuja utilização se pretende minimizar através do método de análise de cenários são os seguintes:

- Cais do porto de Sines (cais 1, cais 2 e cais 3);
- Grua;
- Rebocadores (rebocador 1 e rebocador 2);
- Navios de instalação *offshore* (navio 1 e navio 2).

Destes recursos, a grua e os navios de instalação *offshore* são aqueles que requerem uma maior atenção ao detalhe com o propósito de estabelecer os melhores contratos possíveis entre as partes interessadas no projeto. Pretende-se que estes três recursos tenham o menor tempo de utilização possível, pois são os que exigem mais do orçamento estimado, daí ser fundamental que os seus períodos de laboração sejam constantes e não sejam permanentemente interrompidos devido a WDT. A existência de WDT resulta num maior período de mobilização dos recursos, o que tem como consequência um aumento expressivo das quantias a despendar. Dá-se, assim, preferência à minimização da utilização destes recursos comparativamente à utilização dos cais do porto de Sines e aos rebocadores, que por serem recursos locais não terão tanto impacto a nível orçamental.

Aliado à otimização dos recursos, através do processo de análise de risco pretende-se então dar resposta às seguintes questões:

- Quando é que devem a grua e os navios de instalação *offshore* ser mobilizados de modo a alcançar o melhor ponto de compromisso para o projeto?
- Qual é o WDT expectável para a montagem dos aerogeradores e para a instalação *offshore* que levará a grua e os navios e os rebocadores a não poderem operar?
- Qual é a duração da montagem dos aerogeradores e da instalação *offshore*? E quais são as datas de fim mais prováveis para os dois processos?

- Qual é a duração da utilização da grua desde a sua mobilização até ao seu descomissionamento? E qual é a duração da utilização do navio 1 e do navio 2 desde as respetivas mobilizações? E no caso dos rebocadores?
- Durante quanto tempo se prevê que cada WF estacará atracado nos respetivos cais do porto de Sines? E qual é o tempo de intervalo entre a conclusão da montagem dos aerogeradores até à saída dos dispositivos para Viana do Castelo? Em que datas se conjeturam estas saídas?
- Em sequência da data de mobilização da grua, qual é o tempo de espera potencial deste recurso pela chegada da plataforma 3 ao porto de Sines?
- Qual é o tempo de espera possível pela chegada de cada WF a Viana do Castelo por parte do navio 2?
- Existe vantagem em fazer o reordenamento das atividades? Se sim, quanto tempo demora a montagem do primeiro aerogerador?

Este grupo de questões retrata um conjunto diverso de possíveis cenários para o projeto WFA. A análise de cenários está referenciada na figura 2.6 da secção 2.2.2.2 como uma das principais metodologias utilizadas em processos de análise de risco de acordo com a abordagem estocástica, em particular na modelação de previsão de eventos.

Segundo a definição, a análise de cenários resume-se a um processo de análise de possíveis acontecimentos futuros considerando vários cenários diferentes [37]. No caso concreto da previsão de eventos, estes variam de acordo com as interações entre sistemas (sistemas de segurança, por exemplo) e o ambiente em redor, podendo variar de cenário para cenário e com alguns eventos a poderem ocorrer sequencialmente e com interdependências entre si [21] [37]. Na aplicação prática da previsão de eventos, a análise de cenários é muitas vezes combinada com outros métodos de previsão tendo em conta a possível variabilidade em cenários individuais, bem como possíveis relações entre diferentes cenários. Este método pode, em suma, prever acontecimentos futuros, atribuir-lhes probabilidades de ocorrência e identificar os fatores que podem dar origem a um determinado evento [21].

A análise de cenários é uma metodologia que, no caso concreto deste projeto, será utilizada para a modelação de previsão do WDT. O WDT designa um acontecimento incerto com claro impacto no desempenho do projeto, daí ser a principal contribuição desta dissertação desenvolver uma metodologia que, com base na análise de cenários, permita avaliar esse mesmo impacto para apoio à tomada de decisão.

### 3.2.3. Proposta Metodológica

A proposta metodológica feita nesta dissertação pode ser sintetizada através do esquema apresentado na figura 3.3:

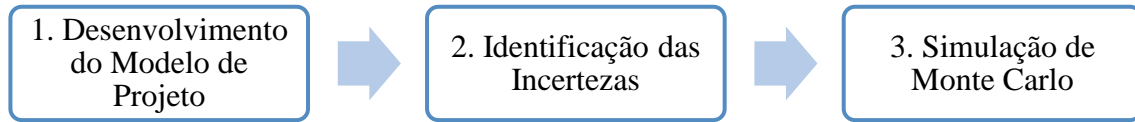


Figura 3.3 – Proposta metodológica

#### 1. Desenvolvimento do Modelo de Projeto

Para proceder à análise de risco será necessário desenvolver, em primeiro lugar, o modelo de projeto. Assim, através da ferramenta Microsoft Project, recorrer-se-á à combinação das técnicas CPM e PDM, apresentadas nas secções 2.2.3.1.1 e 2.2.3.1.2, respetivamente, o que permitirá criar o plano base do projeto. Neste plano estarão dispostas as várias atividades que compõem o projeto, as precedências existentes e os recursos alocados. Este plano seguirá uma calendarização que considera os horários de laboração de cada um dos recursos de acordo com as datas fixadas para o início do projeto e o horário de atividades específicas. Neste modelo estarão ainda indicadas as restrições meteorológicas de  $H_s$  e  $V$  e as janelas temporais (*weather windows*) para as quais serão calculados os valores de WDT.

#### 2. Identificação das Incertezas

Desenvolvido o modelo de projeto, será tempo de identificar as suas incertezas, passando este a ser tido, assim, como um modelo de risco. Para isso utilizar-se-ão distribuições de probabilidade para as datas de chegada das plataformas ao porto de Sines e, seguidamente, aplicar-se-á a metodologia de análise que terá por base o já abordado método de análise de cenários que permitirá identificar a quantidade de WDT a introduzir no projeto. Por último, identificar-se-ão os *outputs* que darão resposta às questões colocadas anteriormente. Nesse sentido recorrer-se-á à combinação das ferramentas Microsoft Excel e @RISK.

### 3. Simulação de Monte Carlo

Após estarem identificadas as incertezas, recorrer-se-á ao processo estocástico abordado na secção 2.2.3.3.1, a simulação de Monte Carlo, por forma a executar um número pré-estabelecido de iterações com o objetivo de gerar os *outputs* necessários à solução do problema. A simulação irá incidir sobre o modelo de risco, apelando, para isso, à mesma combinação das ferramentas Microsoft Excel e @RISK utilizada na fase antecedente.

#### 3.2.3.1. Processo Alternativo

Enveredando por outro caminho que não aquele que é proposto nesta dissertação, o qual tem o método de análise de cenários como ponto central, é possível ter uma outra perspetiva do projeto WFA. Em vez de se assumir que 2018 poderá ter o mesmo comportamento que qualquer um dos anos existentes no conjunto de dados históricos utilizado, poder-se-á fazer, com base nesse mesmo histórico, uma previsão de séries temporais com o objetivo de ter uma ideia mais concreta das condições meteorológicas que poderão realmente existir nesse ano. Recorrendo a métodos de análise de padrões, tendências e sazonalidade, e com o registo constante de novos dados oceanográficos, neste caso de  $H_s$  e  $V$ , poder-se-á tentar prever quais as condições expectáveis para 2018 com o propósito de ficar a saber o que poderá de facto advir desse ano.

O principal motivo que leva à necessidade de fazer uma análise preliminar do risco deste projeto é a incapacidade de prever a incerteza. A incerteza das condições meteorológicas é a responsável primária por esta questão, daí ser fundamental analisá-la e avaliá-la. Se se conseguir fazer uma previsão de séries temporais para 2018 suficientemente precisa e fidedigna, esta incerteza será grandemente minorada, o que dará origem a ter uma maior liberdade e flexibilidade para a definição do planeamento do projeto. Como consequência, esta metodologia é uma alternativa à proposta metodológica anterior. Porém, nesta dissertação pretende-se apenas adotar o método de análise de cenários como base para o desenvolvimento da metodologia de análise, sendo a previsão de séries temporais uma simples proposta para trabalho futuro.

### 3.2.4. Pressupostos

Para a execução do processo de análise de risco serão assumidos os seguintes pressupostos:

- As durações das atividades são variáveis determinísticas;
- As atividades não são interrompidas;
- Os recursos estão sempre disponíveis;
- A probabilidade de ocorrência de cada ano do conjunto de dados históricos durante uma simulação de Monte Carlo é igual;
- As três plataformas vão chegar ao porto de Sines nas datas fixadas, sendo que cada uma delas terá associada uma distribuição triangular;
- A mobilização da grua e dos navios de instalação *offshore* dar-se-ão nas datas fixadas, podendo estas ser definidas para qualquer dia do ano;
- A grua não terá de aguardar pela chegada ao porto de Sines dos componentes dos aerogeradores;
- Os rebocadores não terão de ser mobilizados;
- Só haverá reordenamento das atividades alusivas à montagem dos aerogeradores das duas primeiras plataformas que chegarem ao porto de Sines;
- Só haverá reordenamento das atividades alusivas à instalação *offshore* no que toca à instalação do sistema de âncoras.

Com base nestes pressupostos proceder-se-á então ao desenvolvimento do processo de análise de risco, sendo que o foco principal é o WDT, a variável considerada mais crítica para o projeto.



## 4. Ensaio da Proposta Metodológica

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de análise desenvolvida na presente dissertação. Na secção 4.1 faz-se uma breve abordagem à metodologia com o objetivo de resumir o método pela qual ela se processa. Na secção 4.2, através da elaboração e esclarecimento passo-a-passo de um caso de referência, dá-se a conhecer com mais detalhe a metodologia e como esta irá ser aplicada na fase de implementação do projeto em estudo.

### 4.1. Sinopse

A metodologia de análise desenvolvida nesta dissertação utiliza como variáveis de entrada as durações das atividades de um modelo de projeto em paralelo com as condições meteorológicas que viabilizam e/ou impedem a sua realização, condições essas que derivam de um conjunto de dados históricos distribuído em séries temporais. Sobre as variáveis de saída identificadas no modelo de risco é executada a simulação de Monte Carlo com o propósito de estimar dados relevantes, entre os quais, por exemplo, o WDT total ou a duração total do projeto para uma data de início previamente definida.

Durante uma simulação, a cada iteração, o modelo de risco gera uma data aleatória da respetiva série temporal, denominada *timestamp*, e analisa o respetivo cenário cruzando as durações das atividades com as limitações meteorológicas dessa mesma *timestamp* por forma a obter o WDT esperado. Caso se verifique um WDT não nulo, adiciona-se o respetivo valor à duração do projeto com o objetivo de simular a existência de atraso aquando da realização da atividade em questão. Porém, sempre que uma

determinada atividade não pode ser realizada após a conclusão da atividade precedente devido a WDT não nulo e pode ser reordenada, o modelo faz o reordenamento e procede com a análise com base no novo cenário com o intuito de otimizar a duração do projeto.

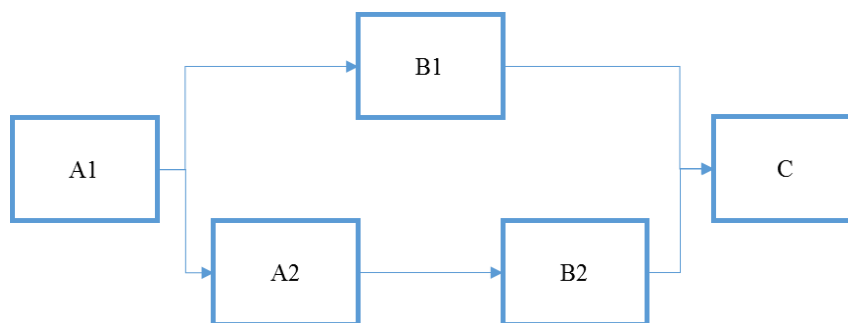
## 4.2. Caso de Referência

No sentido de definir e testar a metodologia de análise a aplicar no projeto em estudo, foi desenvolvido um caso de referência constituído por um conjunto de atividades com as particularidades apresentadas na tabela 4.1:

**Tabela 4.1 – Particularidades do caso de referência**

Atividade	Duração [h]	Precedência	<i>Hs</i> máximo [m]
A1	6	–	3
B1	2	A1	1,5
A2	6	A1	3
B2	2	A2	1,5
C	4	B1; B2	2,5

O respetivo diagrama de precedências está representado na figura 4.1:



**Figura 4.1 – Diagrama de precedências do caso de referência**

No desenvolvimento do modelo de projeto será utilizado o mesmo recurso para todas as atividades. Este recurso, intitulado RH, terá um horário de laboração ininterrupto de 24 h/dia, o que significa, segundo o planeamento, que irá operar durante 20 h seguidas. Todas as atividades terão uma dependência do tipo FS sem qualquer adição de *lead* ou

*lag time*. O dia 15 de maio de 2018 foi escolhido arbitrariamente como data de início do projeto.

#### 4.2.1. Desenvolvimento do Modelo

Uma vez que no desenvolvimento da metodologia se pressupõem os vários passos a cumprir na fase de implementação (abordada no capítulo 5), numa primeira etapa há que construir o modelo de projeto do caso de referência através da criação do plano base do mesmo. Para isso recorreu-se à combinação das técnicas CPM e PDM através da ferramenta Microsoft Project. O modelo desenvolvido está representado na figura 4.2:

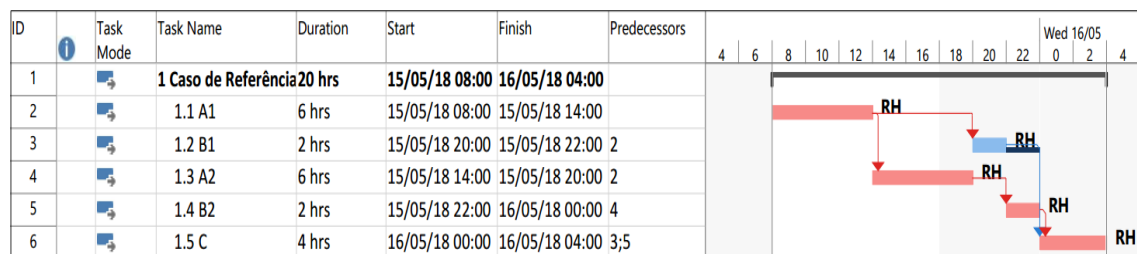


Figura 4.2 – Modelo de projeto do caso de referência

Como se pode verificar pelo Gantt *chart* apresentado na figura 4.2, a vermelho está representado o caminho crítico do projeto, o qual inclui a sequência de atividades A1-A2-B2-C. Para a atividade B1, representada a azul, há uma folga associada de 2 h (igual à duração da atividade B2), o tempo que a atividade poderia atrasar até não colidir com o agendamento da atividade sucessora (atividade C), daí não estar incluída no caminho crítico. Contudo, note-se que existe apenas um recurso e que foi necessário fazer o seu nivelamento de modo a que não haja sobrealocação das atividades B1 e A2, uma vez que ambas têm a mesma precedência (atividade A1). Caso não se fizesse o nivelamento do recurso, o cronograma adotaria o aspeto ilustrado na figura 4.3:

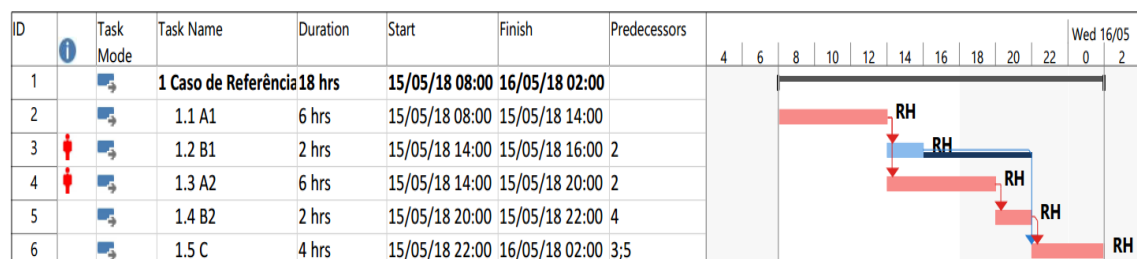
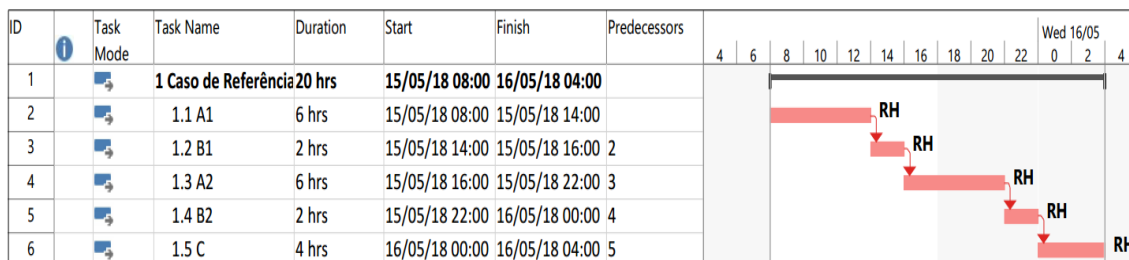


Figura 4.3 – Modelo de projeto do caso de referência (sem nivelamento)

Tal como se pode aferir pela figura 4.3, a duração do projeto passaria a ser de 18 h em vez das 20 h iniciais, pois as atividades B1 e A2 ficariam sobrealocadas. Além disso, a folga da atividade B2 passaria de 2 h para 8 h, um aumento de 6 h que equivale à mesma duração da atividade A2. Sabendo que não podem haver atividades sobrealocadas, é, portanto, necessário fazer o nivelamento do recurso RH com o intuito de obter a duração do projeto correta como demonstrado na figura 4.2.

De qualquer das formas, o modelo de projeto apresentado na figura 4.2, apesar de respeitar fielmente as precedências entre as várias atividades que o compõem e ter a duração correta, não traduz o que realmente aconteceria se de facto fosse implementado, pois, na verdade, a atividade B1 nunca terá uma folga associada. Dado que todas as atividades têm alocado o mesmo recurso, se houver derrapagem da duração em qualquer uma das atividades do modelo, incluindo da atividade B1, todo o projeto irá ver a sua duração aumentada. Posto isto, optou-se por alterar o modelo de projeto original para um modelo composto por um conjunto de atividades totalmente sequencial. Isso permite, de igual modo, ter a duração do projeto correta, mas permite também traduzir mais realisticamente o que aconteceria na prática e ainda ter um cronograma de mais fácil interpretação.<sup>5</sup> O modelo de projeto final está reproduzido na figura 4.4:



**Figura 4.4 – Modelo de projeto final do caso de referência**

Como se pode constatar pela figura 4.4, este novo modelo de projeto não respeita as precedências apresentadas na tabela 4.1 e/ou na figura 4.1, mas isso não implica quaisquer alterações no desenvolvimento da metodologia de análise. A metodologia seguirá um método ardiloso que se adapta eficazmente a este modelo de projeto e que contorna qualquer tipo de limitação computacional que existiria ao ter um modelo de

<sup>5</sup> Neste caso foi atribuída à atividade B1 prioridade sobre a atividade A2, sendo esta última sucessora da primeira, mas caso fosse a atividade A2 a ter prioridade sobre a atividade B1, o resultado final seria idêntico, havendo apenas a alteração do Gantt chart, o qual assume um papel meramente ilustrativo.

projeto como aquele que está representado na figura 4.2. Como se pode averiguar, o caminho crítico é agora incluído por todo o conjunto de atividades, com todas elas a serem realizadas uma após outra e, por isso, sem qualquer necessidade de nivelamento do recurso RH. Este modelo pode ser tido como o modelo ideal e seria aquele que teria efeito se não se confirmassem limitações de *Hs* que tivessem como consequência a introdução de WDT.

## 4.2.2. Identificação das Incertezas

### 4.2.2.1. *Weather Downtime* e Geração da *Timestamp* Aleatória

Desenvolvido o modelo de projeto, e tendo já sido efetuada a sua integração na ferramenta Microsoft Excel/@RISK, é tempo de identificar as incertezas, o que por si só representa o ponto nevrálgico da metodologia de análise.

Neste caso, a única incerteza considerada é o WDT, o qual será diretamente analisado a partir de um conjunto de dados históricos com o propósito de avaliar o seu impacto para cada uma das atividades presentes. Dado que a data de início do projeto foi fixada para o mês de maio, o objetivo passa por, durante uma simulação, a cada iteração, gerar aleatoriamente uma das 47616 *timestamps* relativas a este mesmo mês (24 h x 31 dias de maio x 64 anos = 47616 *timestamps*) e determinar o comportamento do projeto se este tivesse início a partir dessa mesma *timestamp*.<sup>6</sup> Ou seja, pretende-se que a data de início do projeto (15/05/2018, às 08:00) corresponda, no fundo, à *timestamp* gerada aleatoriamente e verificar, a partir desse exato instante, o desempenho do projeto caso se confirmassem precisamente as mesmas condições de *Hs* registadas.

Assim sendo, tendo em conta o conjunto de particularidades apresentadas na tabela 4.1, há que determinar, em primeiro lugar, o WDT. Logo, particularizando para este caso, determinou-se:

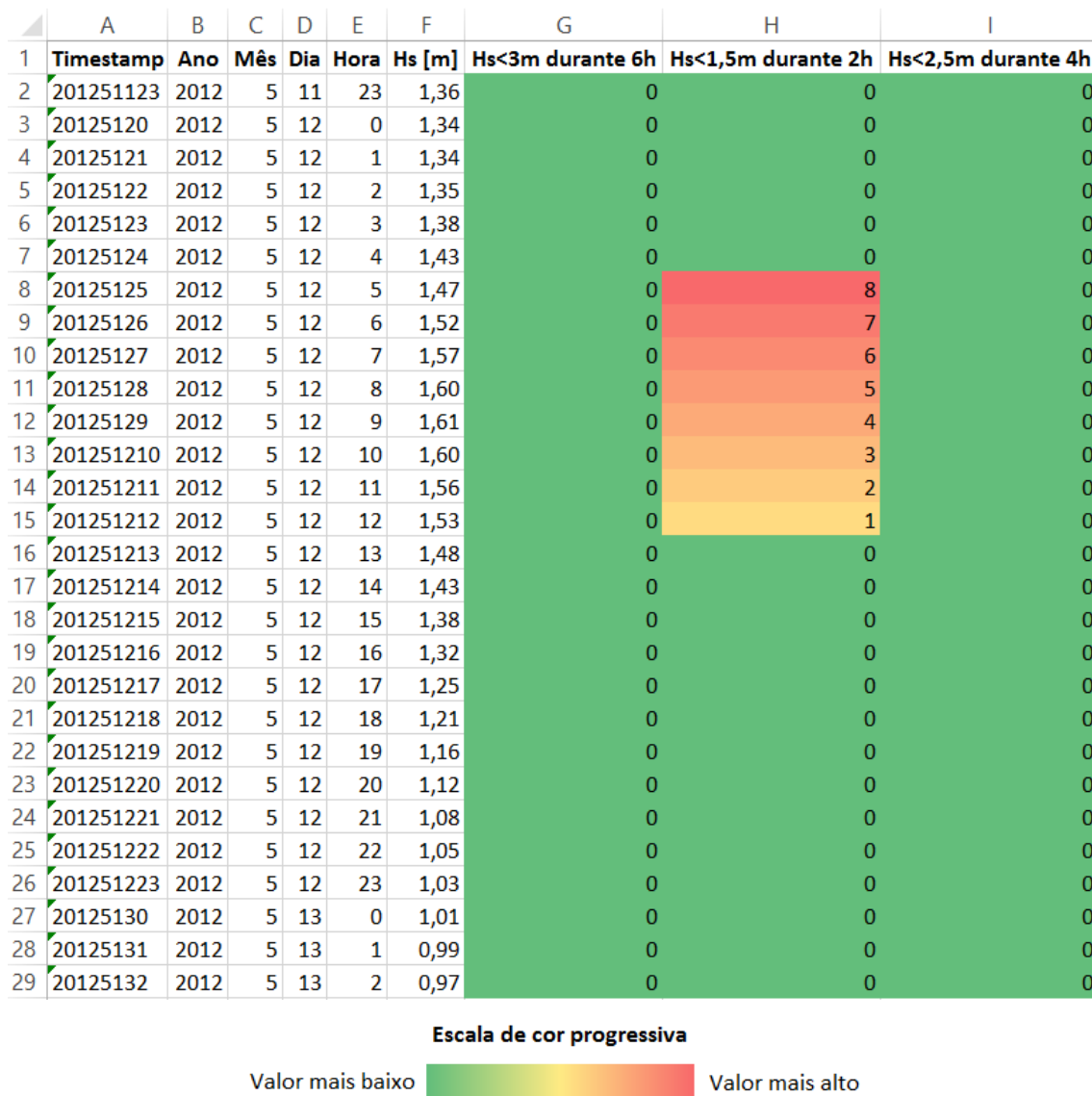
- WDT quando *Hs* é superior a 3 m durante 6 h consecutivas (atividades A1 e A2);

---

<sup>6</sup> Para efeitos de simulação recorreu-se à série temporal relativa à fase de instalação *offshore* por inteiro, de 1950 a 2013 (64 anos), o que resulta num total de 561024 *timestamps* disponíveis.

- WDT quando  $H_s$  é superior a 1,5 m durante 2 h consecutivas (atividades B1 e B2);
- WDT quando  $H_s$  é superior a 2,5 m durante 4 h consecutivas (atividade C).

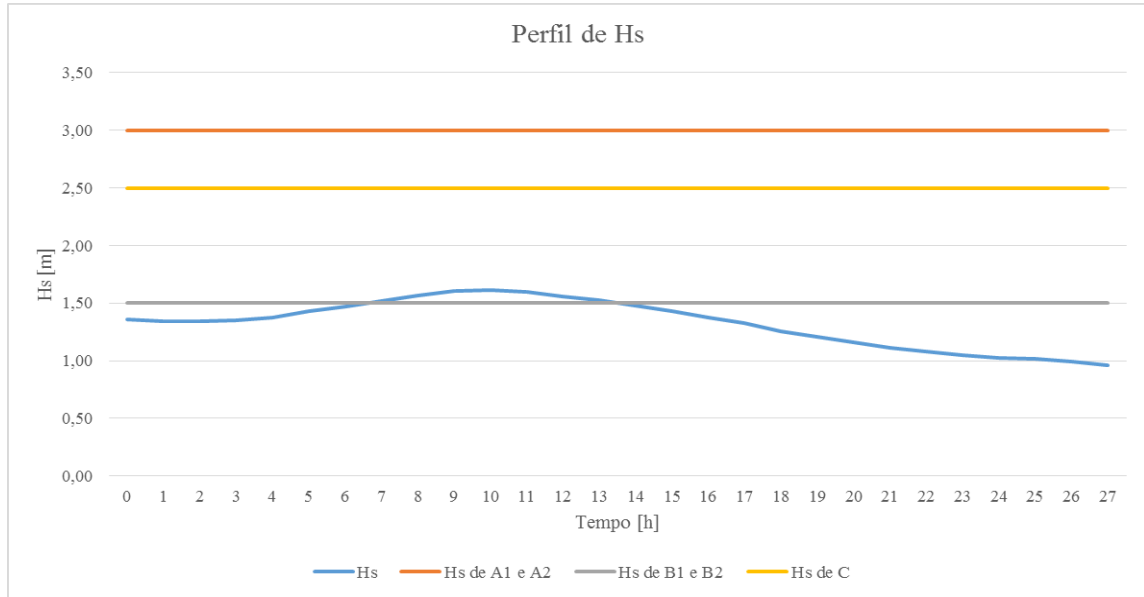
A título de exemplo, e de modo a esclarecer um processo iterativo, assumindo, hipoteticamente, que durante uma simulação, numa dada iteração, a *timestamp* gerada aleatoriamente seria a referente às 23 h do dia 11 de maio de 2012, obter-se-ia o seguinte resultado apresentado na figura 4.5 para esta mesma *timestamp* e para as 27 *timestamps* subsequentes:<sup>7</sup>



**Figura 4.5 – WDT para a *timestamp* gerada aleatoriamente e para as 27 *timestamps* subsequentes**

<sup>7</sup> A figura 4.5 ilustra os valores de WDT calculados para as atividades que compõem o caso de referência dadas as respetivas durações e restrições meteorológicas. A coluna G corresponde às atividades A1 e A2, a coluna H corresponde às atividades B1 e B2 e a coluna I corresponde à atividade C.

À *timestamp* gerada aleatoriamente e às 27 *timestamps* subsequentes está associado o perfil de *Hs* (coluna F da figura 4.5) traçado na figura 4.6:



**Figura 4.6 – Perfil de *Hs***

De modo a gerar aleatoriamente esta *timestamp* e/ou outras *timestamps* a cada iteração durante uma simulação, desenvolveu-se o seguinte conjunto de funções:

$$\text{Ano: } f_{x_1} = \text{ALEATÓRIOENTRE}^8(1950; 2013) \quad (4.1)$$

$$\text{Mês: } f_{x_2} = 5 \quad (4.2)$$

$$\text{Dia: } f_{x_3} = \text{ALEATÓRIOENTRE}(1; 31) \quad (4.3)$$

$$\text{Hora: } f_{x_4} = \text{ALEATÓRIOENTRE}(0; 23) \quad (4.4)$$

$$\text{Timestamp: } f_{x_5} = \text{CONCATENAR}^9(f_{x_1}; f_{x_2}; f_{x_3}; f_{x_4}) \quad (4.5)$$

Este conjunto de funções vai dar origem a uma *timestamp* com o mesmo formato das *timestamps* ilustradas na coluna A da figura 4.5. Nesta situação será a *timestamp* **201251123**, pertencente à célula **A2** da folha de cálculo. Com o intuito de determinar a

<sup>8</sup> ALEATÓRIOENTRE(inferior; superior)

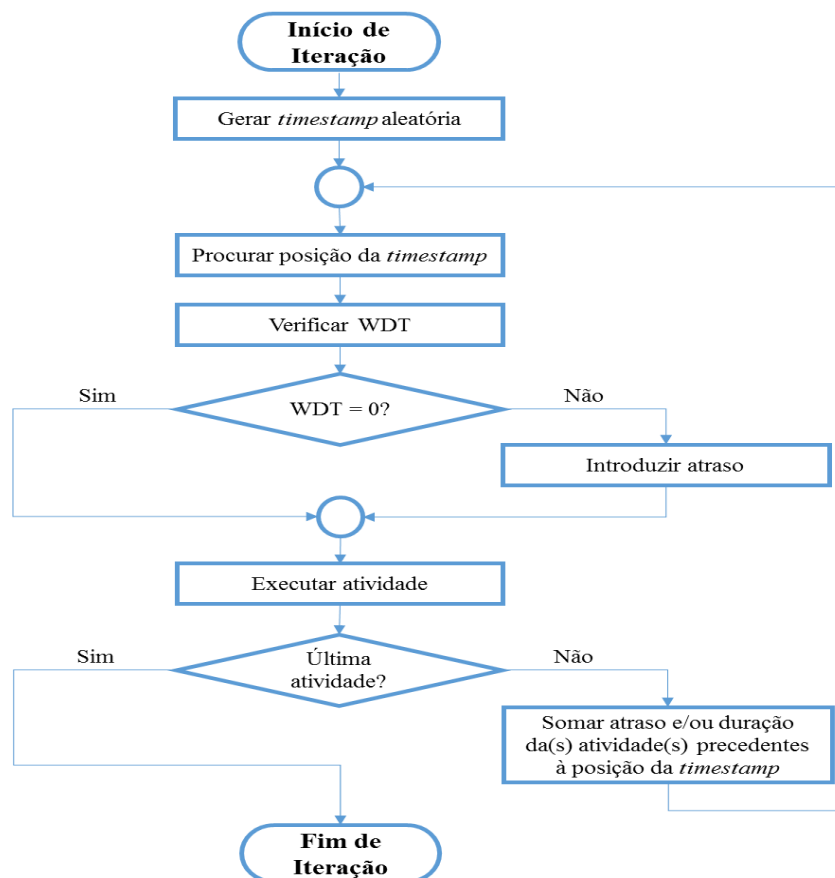
<sup>9</sup> CONCATENAR(texto 1; [texto 2]; ...)

linha a que corresponde a célula A2 (linha 2), ou seja, a posição que designará o ponto de partida para o processo de estimação de WDT de todas as matrizes de  $H_s$  (colunas G, H e I), e/ou outras a cada recálculo do simulador, desenvolveu-se a função (4.6):

$$f_{x_6} = LIN^{10}\left(\acute{INDICE}^{11}(A2:A561025; CORRESP^{12}(f_{x_5}; A2:A561025; 0))\right) \quad (4.6)$$

#### 4.2.2.2. Análise sem Reordenamento

O fluxograma da figura 4.7 ilustra o método pelo qual se processa a metodologia de análise implementada durante uma iteração numa simulação aquando da inexistência de reordenamento das atividades. Este fluxograma mostra todo o processo iterativo nessa situação desde a geração de uma *timestamp* aleatória até à introdução de atraso e execução das atividades:



**Figura 4.7 – Fluxograma da metodologia de análise (sem reordenamento)**

<sup>10</sup> LIN([referência])

<sup>11</sup> ÍNDICE(matriz; núm\_linha; [núm\_coluna])

<sup>12</sup> CORRESP(valor\_proc; matriz\_proc; [tipo\_corresp])



Tendo gerado a *timestamp* aleatória e encontrado a sua posição na matriz em Microsoft Excel (funções (4.1) a (4.6)), é tempo de dar início à execução das atividades do projeto. Assim, por forma a determinar o WDT da atividade A1, a primeira atividade do projeto, olhando para o exemplo da figura 4.5 e sabendo que a matriz a considerar é a que corresponde à coluna G, vem:

$$f_{x_7} = \text{ÍNDICE}(G1:G561025; f_{x_6}) \quad (4.7)$$

Uma vez que se assume, neste exemplo,  $f_{x_6} = 2$ , isso significa que o valor retornado pela função (4.7) seria o valor da série temporal representado na célula **G2** da figura 4.5. Para essa situação tem-se que o WDT é nulo, o que significa que a atividade A1 não terá qualquer atraso associado e que se pode proceder de imediato à sua realização.

Após a realização da atividade A1, e prosseguindo com o exemplo da figura 4.5, a atividade seguinte, B1, já terá um WDT associado, neste caso de 8 h (célula **H8**). Isto acontece seguindo a mesma lógica da função (4.7), mas somando agora o WDT e a duração da atividade precedente (atividade A1) à linha retornada pela função (4.6), tal como expressa a função (4.8):

$$f_{x_8} = \text{ÍNDICE}(H1:H561025; \text{SOMA}^{13}(f_{x_6}; f_{x_7}; 6)) \quad (4.8)$$

Como se comprovou anteriormente, a atividade A1 não sofreu qualquer atraso, logo a computação do valor de WDT da atividade B1 tem apenas influência da duração da atividade A1 (6 h). Enquanto para a atividade A1 a matriz correspondente é a coluna G, para a atividade B1 a matriz correspondente é a coluna H. Uma vez que a posição para a primeira atividade foi referente à célula **G2**, a segunda posição será agora referente à já mencionada célula **H8** ( $H8 = H2+0+6$ ).

Como foi detetado um WDT não nulo para a atividade B1 vai-se então registar o respetivo valor de atraso (8 h) e adicioná-lo ao modelo de projeto. Feito isso, a atividade B1 pode ser finalmente executada. A atividade sucessora, A2, terá associado o mesmo tipo de processo explicitado até aqui, sendo que agora se soma o WDT e a duração das duas atividades executadas anteriormente (atividades A1 e B1) à linha retornada pela função (4.6) para a coluna G. Para isso desenvolveu-se a função (4.9):

---

<sup>13</sup> SOMA(núm 1; [núm 2]; ...)

$$f_{x_9} = \text{ÍNDICE}(G1:G561025; \text{SOMA}(f_{x_6}; f_{x_7}; 6; f_{x_8}; 2)) \quad (4.9)$$

Da função (4.9), para o exemplo que se está a acompanhar, vem como *output* o valor de WDT referente à célula **G18** ( $G18 = G2+0+6+8+2$ ), ou seja, a atividade A2 tem um WDT nulo, o que permite realizá-la assim que a atividade B1 é concluída.

Após a realização da atividade A2 surge a atividade B2. Prosseguindo na mesma linha seguida até aqui, vem:

$$f_{x_{10}} = \text{ÍNDICE}(H1:H561025; \text{SOMA}(f_{x_6}; f_{x_7}; 6; f_{x_8}; 2; f_{x_9}; 6)) \quad (4.10)$$

Analogamente à atividade precedente, a atividade B2 tem também um WDT nulo, o qual corresponde à célula **H24** ( $H24 = H2+0+6+8+2+0+6$ ), o que significa que a atividade B2 pode ser realizada logo após a atividade precedente estar concluída.

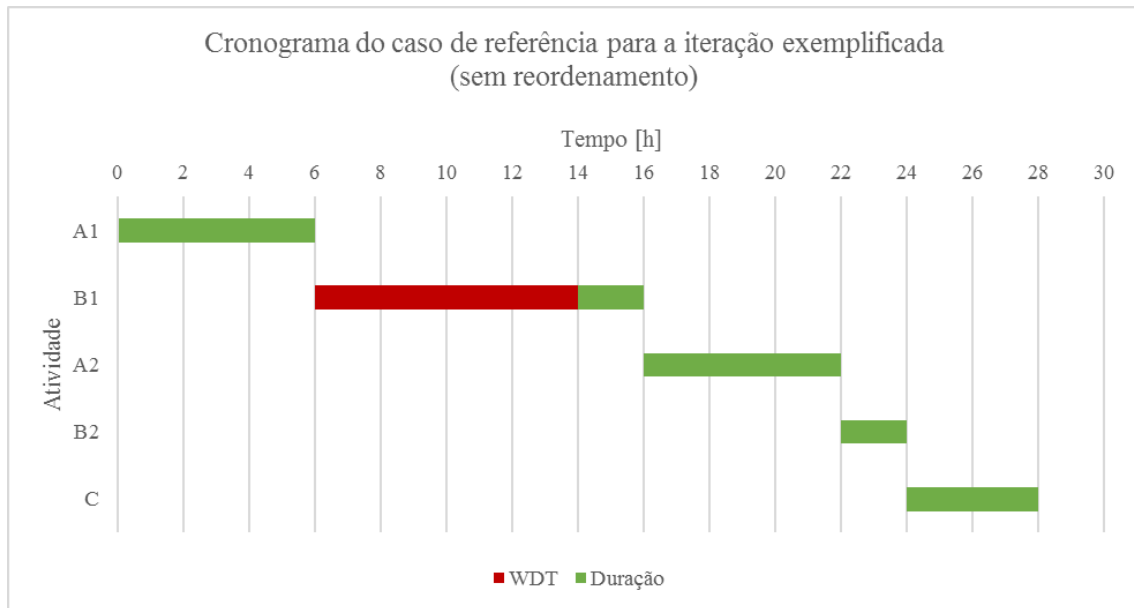
Finalmente, o WDT da atividade C, cuja matriz corresponde à coluna I, é dado por:

$$f_{x_{11}} = \text{ÍNDICE}(I1:I561025; \text{SOMA}(f_{x_6}; f_{x_7}; 6; f_{x_8}; 2; f_{x_9}; 6; f_{x_{10}}; 2)) \quad (4.11)$$

Da função (4.11) é retornado o valor de WDT referente à célula **I26** ( $I26 = I2 + 0+6+8+2+0+6+0+2$ ), logo a atividade C, tal como a atividade B2, tem um WDT nulo, o que leva a que seja realizada assim que a atividade B2 é concluída.

Uma vez que a atividade C é a última atividade do projeto, após a sua realização dá-se também o fim da iteração. Assim sendo, o caso de referência, para este exemplo iterativo, terá uma duração total de  $0+6+8+2+0+6+0+2+0+4 = 28$  h (WDT de A1 + duração de A1 + WDT de B1 + duração de B1 + WDT de A2 + duração de A2 + WDT de B2 + duração de B2 + WDT de C + duração de C).

De maneira a verificar, numa outra perspetiva, o comportamento do caso de referência para o processo iterativo discutido até aqui, pode-se esboçar o respetivo cronograma, tal como revela a figura 4.8:



**Figura 4.8 – Cronograma do caso de referência para a iteração exemplificada (sem reordenamento)**

#### 4.2.2.3. Análise com Reordenamento

O fluxograma da figura 4.9 ilustra o método pelo qual se processa a metodologia de análise implementada durante uma iteração numa simulação aquando da existência de reordenamento das atividades. Este fluxograma mostra todo o processo iterativo nessa situação desde a geração de uma *timestamp* aleatória até à introdução de atraso, reordenamento e execução das atividades:

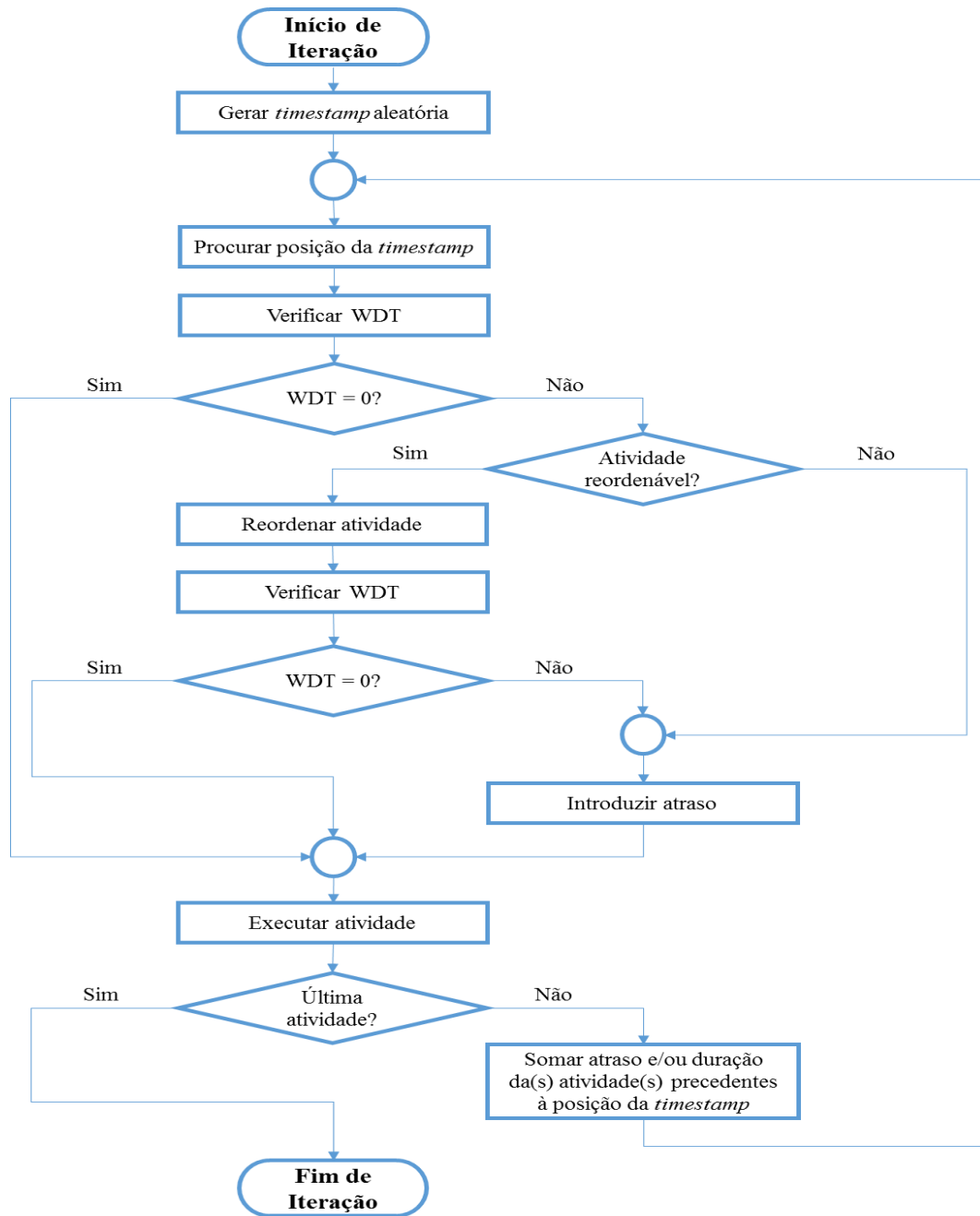


Figura 4.9 –Fluxograma da metodologia de análise (com reordenamento)

Feita uma primeira abordagem (análise sem reordenamento), relembrem-se agora as precedências apresentadas na tabela 4.1 e ilustradas na figura 4.1. A atividade A2 tem a mesma precedência que a atividade B1, logo a atividade A2 também pode ser realizada após a conclusão da atividade A1. Com base nisto, adaptou-se a função (4.8) para que quando se verifique um WDT superior a 6 h (equivalente à duração da atividade A2) para a atividade B1 se proceda à realização da atividade A2 através da troca entre ambas. Vem então pela função (4.12) o seguinte:

$$\begin{aligned}
f_{x_{12}} = SE^{14}(&ÍNDICE(H1:H561025;SOMA(f_{x_6};f_{x_7};6)) \leq 6; \\
&ÍNDICE(H1:H561025;SOMA(f_{x_6};f_{x_7};6)); \\
&ÍNDICE(G1:G561025;SOMA(f_{x_6};f_{x_7};6))
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Considerando o exemplo da figura 4.5, visto que para a atividade B1 o WDT é superior a 6 h, tem-se como *output* da função (4.12) o valor de WDT referente à célula **G8** ( $G8 = G2+0+6$ ) em vez da célula **H8**, que, tal como se teve a oportunidade de observar na secção 4.2.2.2, representaria a atividade B1 se não houvesse reordenamento. Similarmente à atividade A1, cuja função (4.7), neste contexto, se mantém igual, o WDT da atividade A2 é nulo, o que indica que esta pode ser realizada logo após a atividade A1 estar concluída.

Uma vez que se estabeleceu a possibilidade de existência de reordenamento das atividades B1 e A2, a função (4.9) passa a deter o aspeto da função (4.13):

$$\begin{aligned}
f_{x_{13}} = SE(&ÍNDICE(H1:H561025;SOMA(f_{x_6};f_{x_7};6)) \leq 6; \\
&ÍNDICE(G1:G561025;SOMA(f_{x_6};f_{x_7};6;f_{x_{12}};2)); \\
&ÍNDICE(H1:H561025;SOMA(f_{x_6};f_{x_7};6;f_{x_{12}};6))
\end{aligned} \tag{4.13}$$

A função (4.13) permite testar que se o WDT para a atividade B1 for nulo então procura-se a posição da matriz referente à coluna G, pois fica confirmada a realização da atividade B1 primeiro que a atividade A2. Caso contrário procura-se a posição da matriz referente à coluna H, pois realizou-se a atividade A2 primeiro que a atividade B1, que é o que de facto acontece nesta situação. Assim, somando os WDT e as durações das atividades realizadas precedentemente (atividades A1 e A2) à linha retornada pela função (4.6), tem-se como *output* da função (4.13) o valor de WDT referente à célula **H14** ( $H14 = H2+0+6+0+6$ ), ou seja, a atividade B1 tem um WDT de 2 h.

Como foi detetado um WDT não nulo para a atividade B1, mesmo depois de se ter feito o seu reordenamento, vai-se então registar o respetivo valor de atraso (2 h) e adicioná-lo ao modelo de projeto. Feito isso, a atividade B1 pode ser finalmente executada. As atividades sucessoras, B2 e C, terão anexadas o mesmo tipo de função apresentado anteriormente, diferindo apenas nas funções convocadas. Para a atividade B2 o WDT é dado pela função (4.14):

---

<sup>14</sup> SE(teste\_lógico; [valor\_se\_verdadeiro]; [valor\_se\_falso])

$$f_{x_{14}} = \text{ÍNDICE}(H1:H561025; \text{SOMA}(f_{x_6}; f_{x_7}; 6; f_{x_{12}}; 6; f_{x_{13}}; 2)) \quad (4.14)$$

Desta função, para o exemplo que se está a acompanhar, vem como *output* o valor de WDT referente à célula **H18** ( $H16 = H2+0+6+0+6+2+2$ ), ou seja, a atividade B2 tem um WDT nulo, o que leva a que esta seja realizada assim que a atividade B1 é concluída.

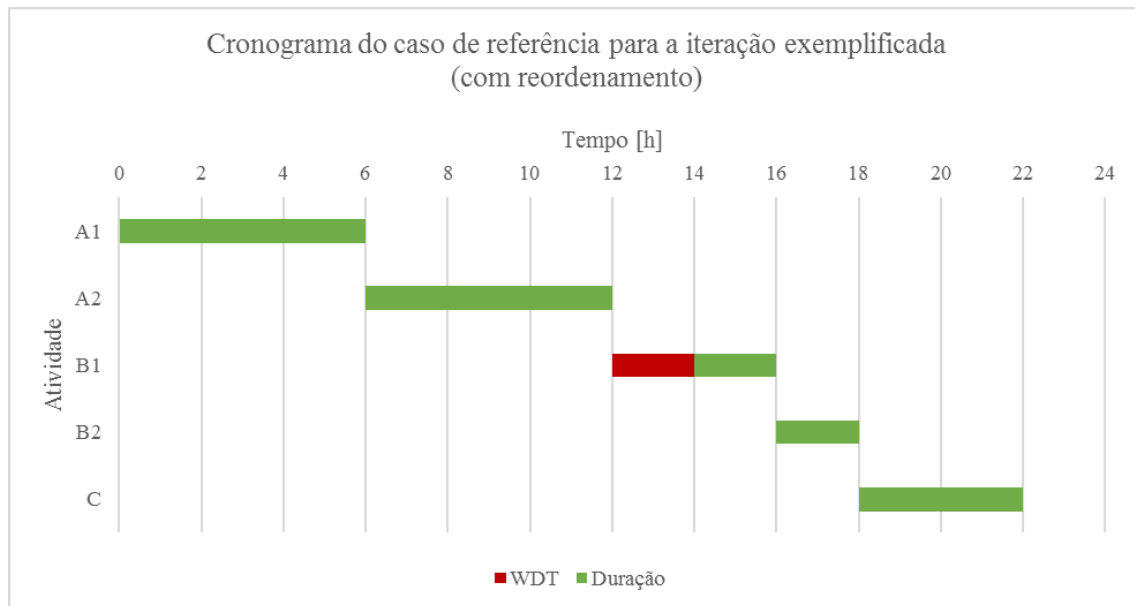
Finalmente, o WDT da atividade C é definido pela função (4.15):

$$f_{x_{15}} = \text{ÍNDICE}(I1:I561025; \text{SOMA}(f_{x_6}; f_{x_7}; 6; f_{x_{12}}; 6; f_{x_{13}}; 2; f_{x_{14}}; 2)) \quad (4.15)$$

Da função (4.15) é retornado o valor de WDT referente à célula **I20** ( $I20 = I2+0+6+0+6+2+2+2+0$ ), logo a atividade C, tal como a atividade precedente, tem um WDT nulo, o que leva a que seja realizada assim que a atividade B2 é concluída.

Posto isto, o caso de referência, para este exemplo de iteração, terá uma duração total de  $0+6+0+6+2+2+0+2+0+4 = 22$  h (WDT de A1 + duração de A1 + WDT de A2 + duração de A2 + WDT de B1 + duração de B1 + WDT de B2 + duração de B2 + WDT de C + duração de C).

De maneira a verificar, numa outra perspetiva, o comportamento do caso de referência para o processo iterativo discutido até aqui, o qual agora inclui o reordenamento de atividades, pode-se esboçar o respetivo cronograma do projeto, tal como revela a figura 4.10:



**Figura 4.10 – Cronograma do caso de referência para a iteração exemplificada (com reordenamento)**

Na figura 4.10 está bem presente a otimização conseguida através do reordenamento das atividades B1 e A2. Se se optasse por não realizar a troca entre ambas, a duração do projeto seria de 28 h em vez de 22 h, o que resultaria num aumento do atraso em 6 h. Ao proceder ao reordenamento consegue-se contornar esta situação e garantir um melhor desempenho ao ter apenas 2 h de atraso para a atividade B1.

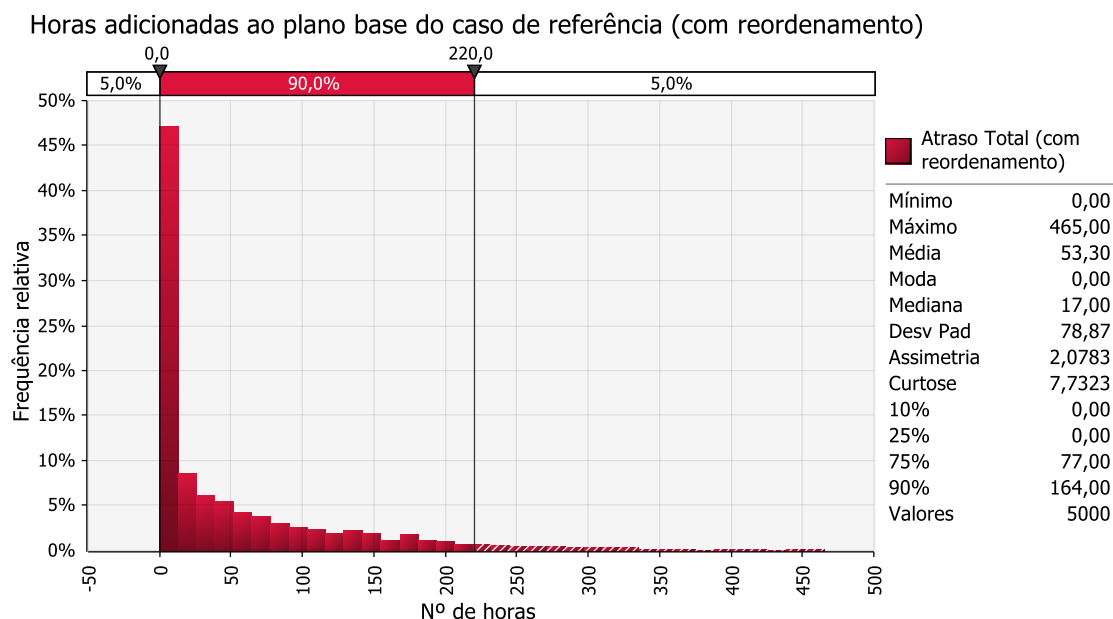
Na tabela 4.2 encontra-se sumariado todo o processo iterativo para o exemplo abordado:

**Tabela 4.2 – Resumo da iteração exemplificada**

<b>Atividade Inicial</b>	<b>Duração [h]</b>	<b>WDT Inicial [h]</b>	<b>Troca?</b>	<b>Atividade Final</b>	<b>WDT Final [h]</b>
A1	6	0	N/A	A1	0
B1	2	8	Sim	A2	0
A2	6	0	Sim	B1	2
B2	2	0	N/A	B2	0
C	4	0	N/A	C	0

### 4.2.3. Simulação de Monte Carlo

Definida a metodologia pode-se finalmente proceder à simulação de Monte Carlo através da ferramenta @RISK. Apesar de na secção 4.2.2 estar explicado um processo iterativo tendo por base o exemplo da figura 4.5, essa abordagem teve apenas como finalidade expor a forma pela qual a metodologia de análise se processa durante uma simulação. A presente secção está orientada para o processo integral de uma simulação de Monte Carlo. Assim, para uma simulação com 5000 iterações, tendo como variável de saída o número de horas adicionadas ao plano base do projeto aquando da existência de reordenamento das atividades, o resultado é o que vem apresentado na figura 4.11:

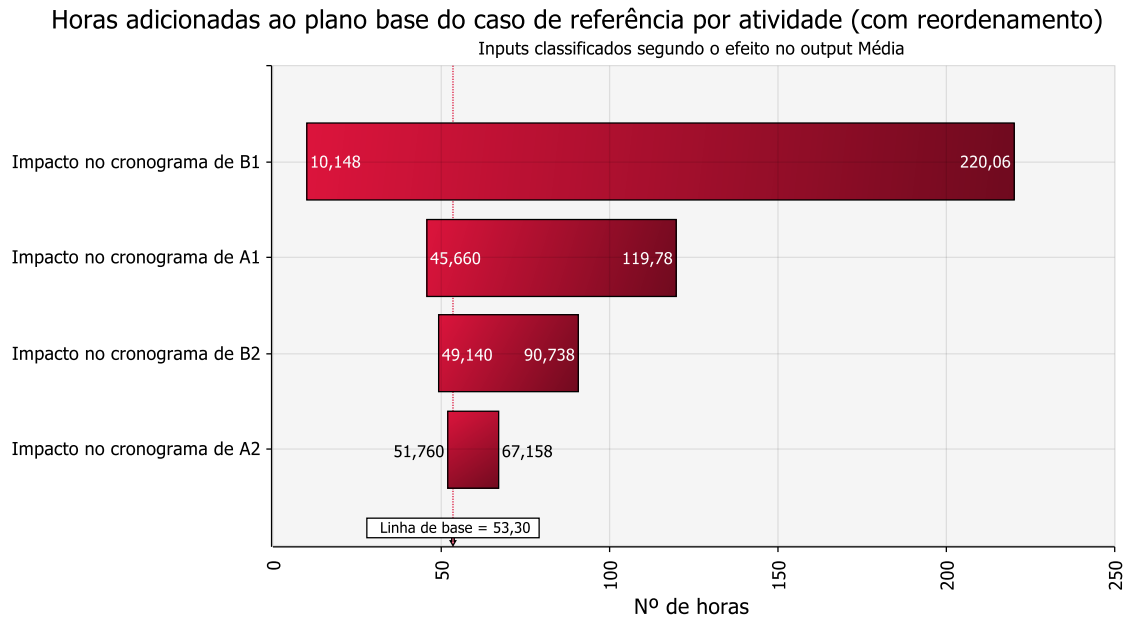


**Figura 4.11 – Horas adicionadas ao plano base do caso de referência (com reordenamento)**

Pode-se observar na figura 4.11 que o número mínimo de horas adicionadas, bem como a moda, é igual a zero, o que demonstra, segundo este último indicador estatístico, que na maioria das iterações efetuadas não foi adicionado qualquer atraso ao projeto. Em contrapartida, o número máximo de horas adicionadas ao plano foi de 465 h. Note-se que o valor máximo de WDT da série temporal analisada, para um  $H_s$  menor que 1,5 m durante 2 h, é de 461 h, o que significa que, durante a simulação, numa determinada iteração, um valor de WDT perto ou igual a este máximo foi incluído na computação. No entanto, este valor, bem como muitos outros, são pontos isolados, têm uma baixa frequência relativa, encontrando-se, por isso, fora do intervalo de confiança, cujo máximo é de 220 h. Destaque ainda para o valor dos percentis: o P10 e o P25 possuem valor nulo, o que significa que existe uma probabilidade de pelo menos 25% de não existir qualquer atraso no projeto; o P75 e o P90 indicam uma probabilidade de 75% de existir um WDT até 77 h e de 90% de existir um WDT até 164 h, respetivamente. Em média são adicionadas cerca de 53 h ao plano base do projeto.

No sentido de verificar quais foram as atividades que tiveram um maior impacto no cronograma face ao número de horas adicionadas em média ao plano base, ou seja, quais foram as atividades que mais contribuíram para a introdução de atraso no modelo de projeto e que assim definiram o número médio de horas adicionadas ao plano base do mesmo, um gráfico de tornado como o ilustrado na figura 4.12 pode ser representado:

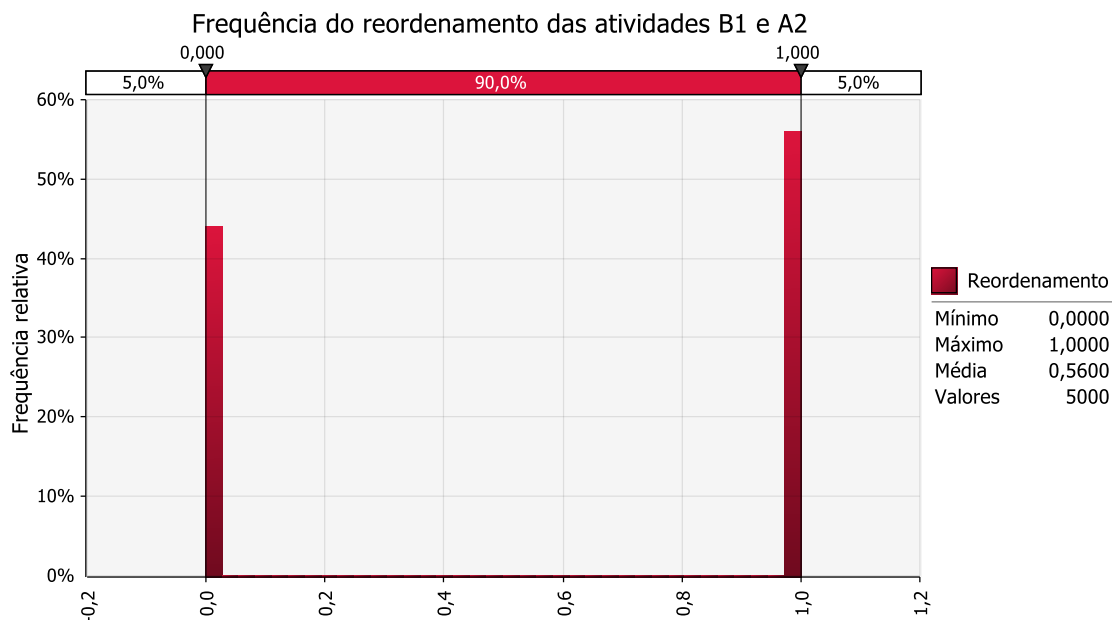




**Figura 4.12 – Horas adicionadas ao plano base do caso de referência por atividade (com reordenamento)**

O gráfico da figura 4.12 é fruto da análise de 10 cenários diferentes – cada cenário corresponde a 500 das 5000 iterações efetuadas, cujos valores dos *inputs* (atraso individual de cada atividade) são dispostos por ordem crescente de modo a calcular a média do *output* (total de atraso) –, com os seus extremos a corresponderem à média dos valores mínimos e máximos de atraso total adicionado ao cronograma. Como se pode averiguar, as atividades B1 e A1 são aquelas que apresentam uma maior influência na média de horas, com os seus extremos a serem aqueles que mais se distanciam do valor da linha de base (~53 h). Evidentemente que já seria expectável que fosse a atividade B1 a deter o maior impacto no cronograma do projeto visto ser a atividade, em paralelo com a atividade B2, com a maior restrição de *Hs*. No entanto, a atividade B1 é realizada sempre primeiro que atividade B2, logo está mais sujeita à existência de WDT, daí a atividade B2 surgir apenas em terceiro lugar no diagrama. A atividade A2 é a quarta atividade com maior impacto na média de horas de atraso adicionadas ao plano e a atividade C nem sequer consta no diagrama, o que significa que esta atividade teve sempre um WDT nulo durante toda a simulação. Isso é perfeitamente viável, visto que a atividade C, ao suceder à atividade B2, que tem uma condição de *Hs* bem mais restrita, tem uma probabilidade muito reduzida de ter um WDT não nulo.

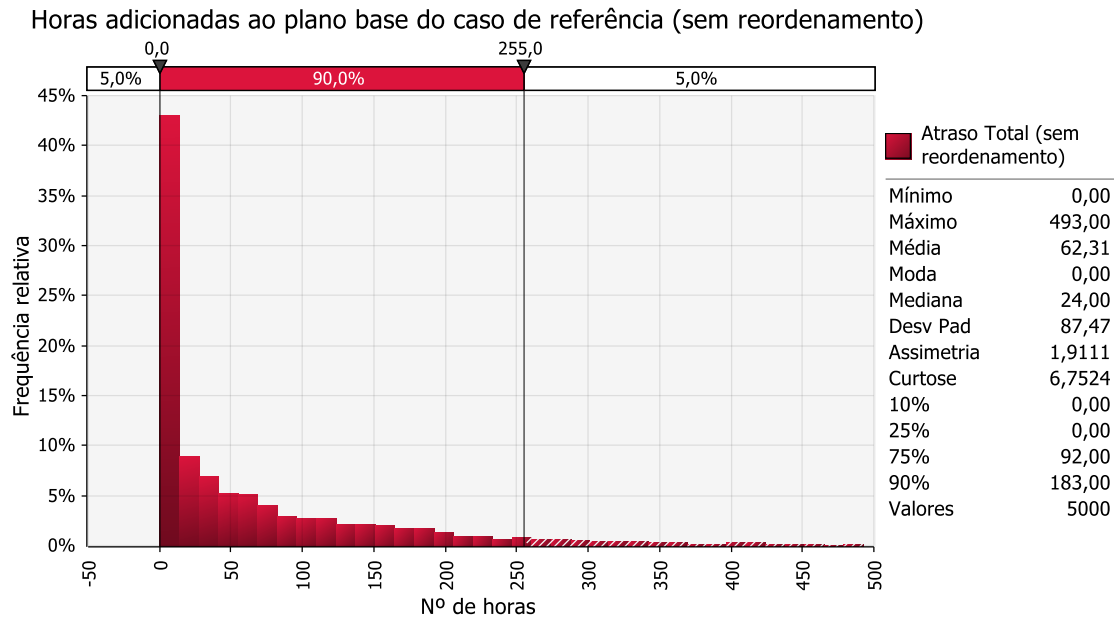
Com o objetivo de verificar o número de iterações em que houve reordenamento das atividades B1 e A2, foi definida uma variável de saída auxiliar que, genericamente, atua por seleção binária. Assim, para esta situação, quando o *output* retorna o valor 0 significa que não houve reordenamento e quando retorna o valor 1 significa que houve. Vem então pela figura 4.13 o seguinte:



**Figura 4.13 – Frequência do reordenamento das atividades B1 e A2**

Como se pode apurar pela figura 4.13, a maior fatia percentual está do lado da existência de reordenamento, sendo que em 56% das 5000 iterações efetuadas (2800 iterações) isso se confirma. Este facto deixa bem patente a importância do reordenamento das atividades de modo a minimizar o número de horas de atraso a adicionar ao plano base do projeto, o que permite otimizar a duração total do mesmo.

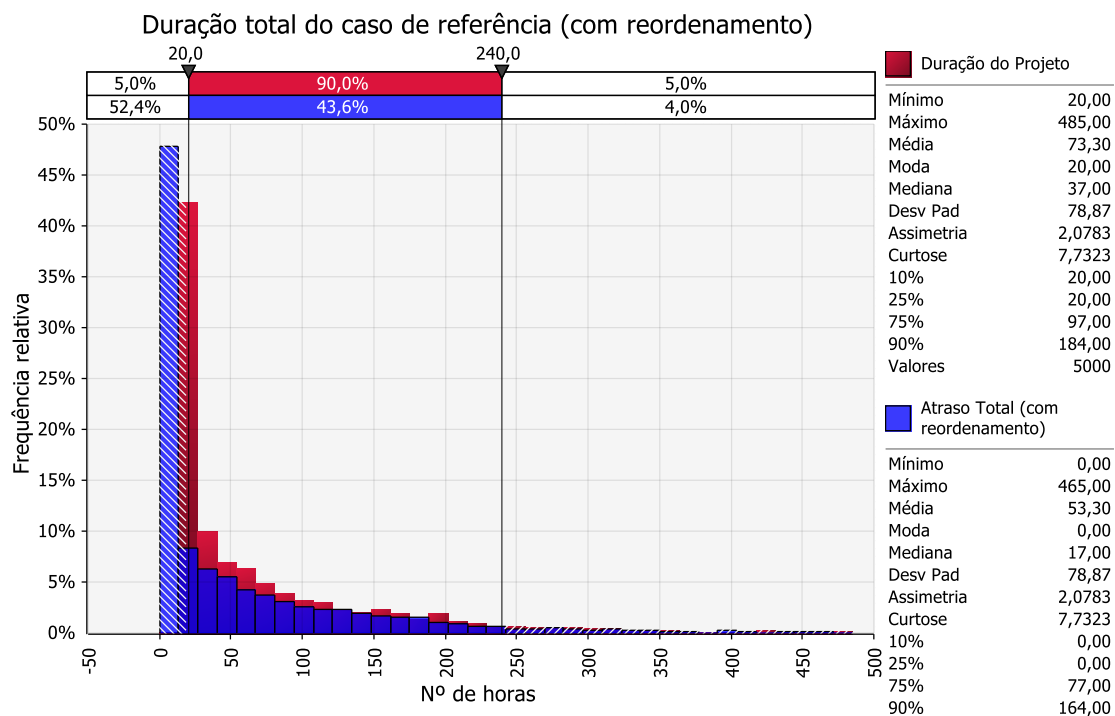
Caso não houvesse reordenamento das atividades, ou seja, caso a atividade B1, mesmo quando sujeita a um WDT superior a 6 h, não trocasse com a atividade A2, o resultado do número de horas adicionadas ao plano base do projeto seria o que está representado na figura 4.14:



**Figura 4.14 – Horas adicionadas ao plano base do caso de referência (sem reordenamento)**

Examinando a figura 4.14 pode-se constatar que todos os indicadores estatísticos apresentados na figura 4.11, com exceção do mínimo e da moda, aumentam razoavelmente. Focando apenas na média, esta passou a adotar um valor de ~62 h, um aumento de ~9 h face ao caso anterior. Este gráfico, contrapondo com o gráfico apresentado na figura 4.11, permite corroborar a importância do reordenamento das atividades para a otimização global do projeto.

Finalmente, vem então para a duração total do projeto, em sobreposição com o gráfico da figura 4.11, o gráfico ilustrado na figura 4.15:



**Figura 4.15 – Duração total do caso de referência (com reordenamento)**

Como se pode apurar pela figura 4.15, para a duração total do caso de referência obtém-se um comportamento muito similar ao comportamento verificado na figura 4.11, sendo que a diferença entre ambos os gráficos reside apenas no facto de no gráfico delineado a vermelho estarem adicionadas exclusivamente as 20 h que representam a duração total das atividades. É como se se tivesse imposto um deslocamento de 20 h ao gráfico delineado a azul, o qual representa o mesmo gráfico da figura 4.11. Uma vez que se assumem as durações das atividades como variáveis determinísticas, basta, assim, somá-las, a cada iteração, às horas de atraso introduzidas no modelo de projeto para que se consiga obter a sua duração total. Como se pode apurar, a metodologia de análise desenvolvida executa essa singularidade com sucesso. Pode-se então concluir, com base nos indicadores estatísticos, que o caso de referência terá em média uma duração total de aproximadamente 73 h e uma probabilidade de 90% de essa mesma duração ir até 184 h.

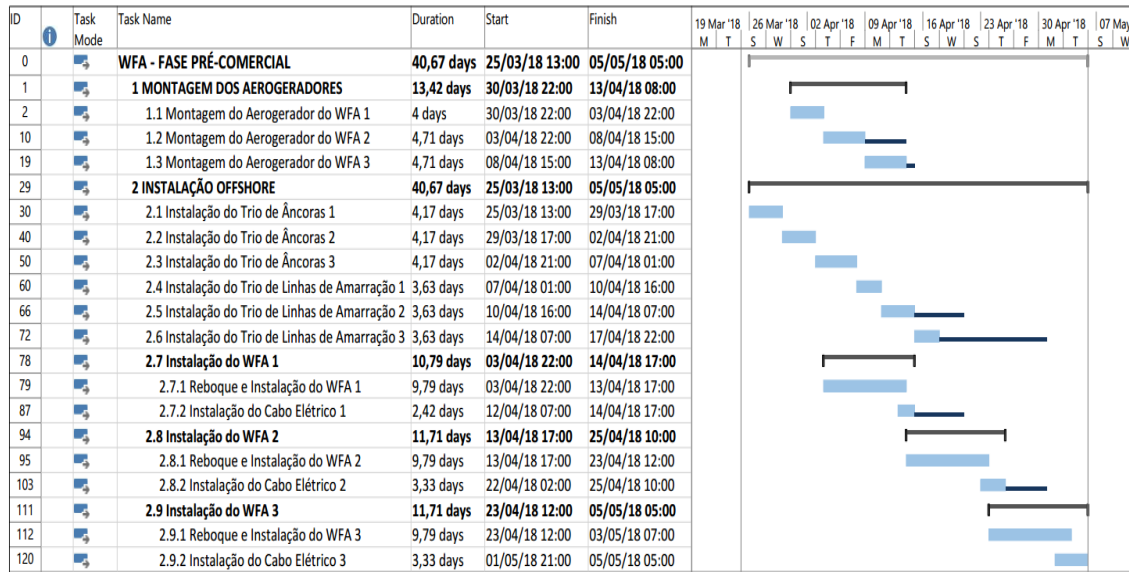
# 5

## 5. Implementação

Neste capítulo apresentam-se os resultados da aplicação no projeto em estudo da metodologia de análise desenvolvida na presente dissertação. Na secção 5.1 exibe-se o modelo de projeto concebido (plano base). Na secção 5.2 são identificadas as incertezas do projeto em estudo, com particular realce para a realização de uma análise de sensibilidade focada no WDT e no reordenamento das atividades. Por último, na secção 5.3 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos pela simulação de Monte Carlo final.

### 5.1. Modelo de Projeto

O modelo de projeto desenvolvido alusivo à fase pré-comercial do projeto WFA está representado, em modo sumário, na figura 5.1. Este modelo contém agregadas todas as atividades que contribuem diretamente para a duração dos vários processos de montagem e instalação indicados. Nele não se consideram, portanto, atividades como a chegada das plataformas ao porto de Sines, a mobilização, desmobilização e descomissionamento dos recursos e a fase preliminar que precede a montagem dos aerogeradores. O modelo de projeto integral encontra-se no Anexo B.



**Figura 5.1 – Modelo de projeto sumário**

O modelo desenvolvido representa o plano base do projeto WFA e, por conseguinte, o caso ideal de execução se não existir atraso na realização das atividades. Alicerçado nas datas mais prováveis de chegada das plataformas WFA ao porto de Sines, em particular da plataforma 3, este modelo foi construído de modo a possuir a menor duração possível. Para isso, além de fixar as datas de chegada das plataformas, fixaram-se ainda as datas de mobilização dos recursos, nomeadamente a grua e os navios de instalação *offshore*. Com o objetivo de delinear o melhor encadeamento entre atividades possível, tem-se então como datas chave do modelo de projeto as seguintes:

- Chegada da plataforma WFA 1 ao porto de Sines – 25/07/2017, às 08:00 h;
- Chegada da plataforma WFA 2 ao porto de Sines – 20/12/2017, às 08:00 h;
- Chegada da plataforma WFA 3 ao porto de Sines – 09/04/2018, às 08:00 h;
- Mobilização da grua – 15/03/2018, às 22:00 h;
- Mobilização do navio 1 – 23/03/2018, às 13:00 h;
- Mobilização do navio 2 – 08/04/2018, às 14:00 h.

A data de mobilização da grua foi fixada para que a conclusão da montagem dos aerogeradores 1 e 2 nas respetivas plataformas coincida com a chegada da plataforma WFA 3 ao porto de Sines. Isso permite que a grua não tenha de ficar à espera tempo algum pela chegada da plataforma para prosseguir com o processo de montagem. No caso da data de mobilização do navio 1, esta foi fixada de maneira a que a instalação do trio de

linhas de amarração 1 seja concluída em simultâneo com a chegada do WFA 1 a Viana do Castelo. Para isso, o dispositivo sai do porto de Sines logo após a montagem do respetivo aerogerador ter sido finalizada. Por último, a data de mobilização do navio 2 foi fixada em 50 h antes da chegada do WFA 1 a Viana do Castelo para que o mesmo esteja disponível para operar sem que os rebocadores tenham de aguardar no local de instalação.

O desenvolvimento do plano base do projeto WFA, tal como o próprio nome indica, é a base do modelo de risco, servindo apenas de referência à sua implementação. As datas de mobilização fixadas para os recursos, neste contexto, não têm em consideração quaisquer limitações meteorológicas que poderão ter influência no desempenho do projeto, daí ser apelidado como o caso ideal. Estas datas, na realidade, são um dos principais focos de estudo e otimização, e só depois de uma análise mais aprofundada do projeto (análise de sensibilidade) se poderá efetivamente fixá-las com critério.

No anexo C encontram-se os resultados obtidos através de uma simulação de Monte Carlo ao nível das datas de fim, durações e WDT expectáveis para os vários sumários de atividades presentes no modelo de projeto base retratado na figura 5.1.<sup>15</sup>

## **5.2. Identificação das Incertezas**

### **5.2.1. Chegada das Plataformas**

A incerteza inerente a este projeto, abordada ao longo desta dissertação e tendo servido como o principal objeto de estudo no capítulo 4, é o WDT. Como descrito, esta variável assume um papel fundamental no desempenho do projeto WFA, daí ser a principal incerteza a identificar nesta secção. Porém, contrariamente ao caso de referência, o WDT não será a única variável a ter em consideração.

Como referido na secção 3.2.4, assume-se como um dos pressupostos deste projeto que as três plataformas WFA irão chegar ao porto de Sines nas datas fixadas, sendo que

---

<sup>15</sup> Dada a dimensão e complexidade do modelo de risco, nesta secção são executadas simulações de Monte Carlo exclusivamente com 50000 iterações. Este horizonte garante a convergência do modelo, o que significa que um menor número de iterações não permitiria obter resultados tão representativos. Em contrapartida, um maior número de iterações não teria implicações na convergência e, portanto, não traria alterações significativas aos resultados obtidos.

cada uma delas terá associada uma distribuição triangular. Isso significa que, para além do WDT, as datas de chegada das três plataformas também retratam incerteza. Assim, foi necessário aplicar a distribuição de probabilidade em questão às datas definidas no modelo de projeto, para que, durante uma simulação, estas possam variar. Essa distribuição tem como valor mais provável as datas presentes no modelo de projeto, um mínimo e um máximo. O mínimo é dado pela data mais provável menos uma semana e o máximo é dado pela data mais provável mais duas semanas. Graficamente, tem-se então para cada uma destas incertezas o que vem representado na figura 5.2:

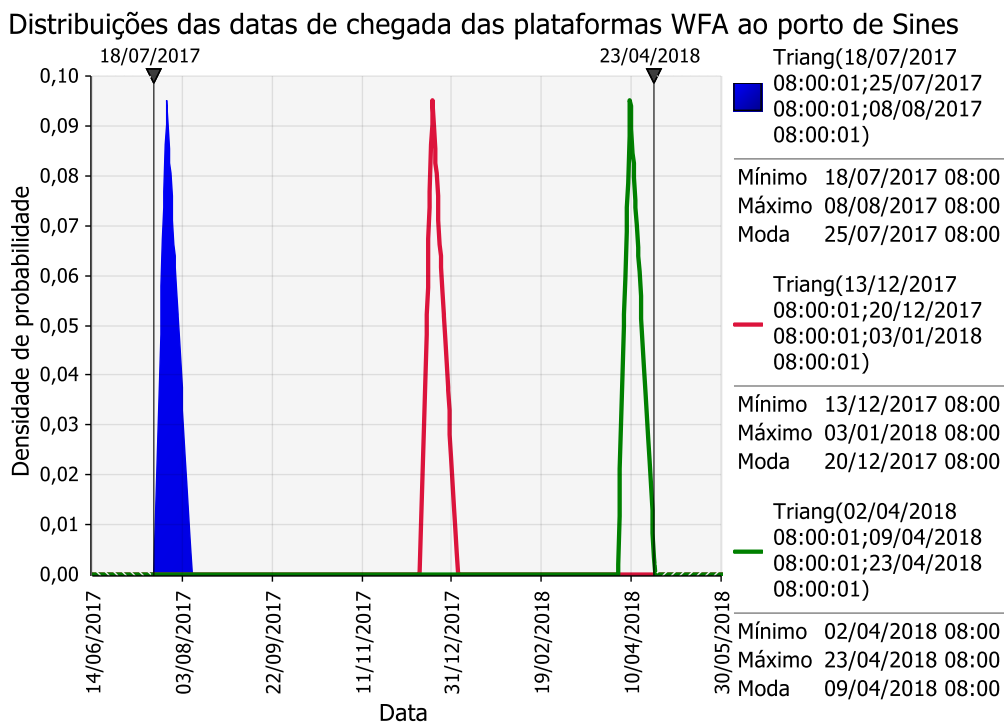


Figura 5.2 – Distribuições das datas de chegada das plataformas WFA ao porto de Sines

## 5.2.2. Análise de Sensibilidade

### 5.2.2.1. *Weather Downtime*

Estando identificadas as distribuições das datas de chegada das plataformas WFA ao porto de Sines, há que fazer agora uma análise de sensibilidade com o objetivo de determinar o WDT expectável para o projeto. Optou-se, assim, por estudar o WDT para os meses entre março e agosto, uma vez que não se pretende que o projeto se prolongue para o período de outono/inverno. Admite-se que tanto a montagem dos aerogeradores como a instalação *offshore* poderão ter início nos meses selecionados, sendo o WDT



referente ao tempo de inoperação entre o início e a conclusão de cada uma das fases. As datas previamente estabelecidas para a mobilização dos recursos manter-se-ão para os respectivos meses, às quais atribuir-se-á a geração de um conjunto mensal de *timestamps*. Ou seja, as datas de mobilização dos recursos verão apenas alterado o mês que se pretende analisar, mantendo o dia e a hora originais do modelo de projeto.

Na tabela 5.1 está apresentado o WDT expectável durante a montagem dos aerogeradores entre os meses de março e agosto:

**Tabela 5.1 – WDT expectável durante a montagem dos aerogeradores**

Mês	NET <sup>16</sup> [dias]	WDT [dias]				
		Média	P10	P50	P75	P90
Março	13,4	8,6	2,8	7,5	11,3	16,6
Abril		7,6	3,0	7,0	10,3	13,5
Maio		8,4	2,1	7,4	11,8	16,1
Junho		11,2	2,5	10,5	15,3	21,0
Julho		7,5	2,3	7,4	10,1	13,0
Agosto		4,3	0,9	3,8	6,0	8,3

Como se pode verificar pela tabela 5.1, o mês que apresenta os menores valores de WDT durante a montagem dos aerogeradores é o mês de agosto.

Na tabela 5.2 está apresentado o WDT expectável durante a instalação *offshore* entre os meses de março e agosto:

<sup>16</sup> O valor NET (arredondado às décimas) corresponde à duração determinística total da montagem dos aerogeradores, a qual consta no modelo de projeto sumário representado na figura 5.1.

**Tabela 5.2 – WDT expectável durante a instalação *offshore***

Mês	NET <sup>17</sup> [dias]	WDT [dias]				
		Média	P10	P50	P75	P90
Março	40,7	31,1	12,5	29,4	40,6	52,1
Abril		17,8	6,0	16,0	23,5	32,0
Maio		8,9	1,8	7,4	11,8	17,9
Junho		4,5	0,1	3,7	6,5	9,6
Julho		6,3	0,3	4,3	8,7	14,7
Agosto		21,2	3,3	16,0	28,8	45,5

Como se pode verificar pela tabela 5.2, o mês que apresenta os menores valores de WDT durante a instalação *offshore* é o mês de junho.

O facto de o mês mais favorável para a montagem dos aerogeradores ser agosto e não junho, que se revela como o melhor mês para dar início à instalação *offshore*, ou qualquer outro mês precedente, resulta na necessidade de mobilizar a grua num mês não tão favorável, visto que a instalação *offshore* está dependente desta fase. Apesar de a instalação do sistema de âncoras e linhas de amarração poder ocorrer em paralelo com a montagem dos aerogeradores, pois são acontecimentos não dependentes, o *hook-up* dos WFA está sujeito à data de conclusão do processo no porto de Sines.

Mobilizar a grua mais tarde, designadamente em agosto, daria origem a ter menos dias de WDT, o que resultaria numa diminuição dos custos associados a este recurso. Mas, numa outra perspetiva, adiar o início da montagem dos aerogeradores significaria ter mais WDT durante instalação *offshore* ao estender o projeto para um período sazonal diferente. Logo, mesmo que as condições meteorológicas em agosto sejam mais convenientes para a montagem dos aerogeradores, este processo terá de ser obrigatoriamente antecipado para não afetar a instalação *offshore*, pois esta fase é aquela que apresenta maior criticidade para o projeto dada a sua longa duração.

<sup>17</sup> O valor NET (arredondado às décimas) corresponde à duração determinística total da instalação *offshore*, a qual consta no modelo de projeto sumário representado na figura 5.1.

Dado isto, observando novamente as tabelas 5.1 e 5.2, para se conseguir uma maior otimização dos recursos privilegiar-se-á então o mês mais profícuo para a instalação *offshore*, junho. Para a montagem dos aerogeradores, abril e maio são os meses precedentes que possuem as melhores condições. Embora ambos não sejam os meses mais favoráveis para a grua operar devido ao maior número de dias de WDT, existem, em compensação, claras vantagens com esta opção. Mobilizar a grua em abril ou maio permitirá ter uma larga margem para não afetar a instalação *offshore* caso haja uma derrapagem da duração muito significativa. Somado a isso, tendo em conta a distribuição da data de chegada da plataforma WFA 3, a grua nunca irá ter de aguardar pela mesma, o que indica que esta distribuição terá apenas impacto no tempo de utilização do cais 3.

Definidos os meses para os quais o modelo de risco será testado, chega o momento de determinar com mais algum detalhe o WDT que os caracteriza. Para isso, dividir-se-ão os meses de abril, maio e junho nos respetivos períodos quinzenais. Isso permitirá apurar com mais alguma minúcia, através da geração de um conjunto de *timestamps* mais restrito, em quais períodos se deve dar início à montagem dos aerogeradores e à instalação *offshore*.

Na tabela 5.3 está apresentado o WDT expectável durante a montagem dos aerogeradores nas duas quinzenas de abril e nas duas quinzenas de maio:

**Tabela 5.3 – WDT expectável durante a montagem dos aerogeradores nas duas quinzenas de abril e nas duas quinzenas de maio**

Mês	NET [dias]	WDT [dias]				
		Média	P10	P50	P75	P90
1-15 de Abril	13,4	7,7	3,0	6,7	10,7	14,2
16-30 de Abril		7,5	2,8	7,1	9,8	13,0
1-15 de Maio		7,1	2,3	6,2	9,8	13,1
16-31 de Maio		9,6	2,0	8,8	13,8	18,0

Como se pode verificar pela tabela 5.3, a primeira quinzena de maio é a que apresenta os menores valores de WDT durante a montagem dos aerogeradores.

Na tabela 5.4 está apresentado o WDT expectável durante a instalação *offshore* nas duas quinzenas de maio e nas duas quinzenas de junho:

**Tabela 5.4 – WDT expectável durante a instalação *offshore* nas duas quinzenas de maio e nas duas quinzenas de junho**

Mês	NET [dias]	WDT [dias]				
		Média	P10	P50	P75	P90
1-15 de Maio	40,7	10,5	2,7	8,8	13,8	21,1
16-31 de Maio		7,4	1,1	6,3	9,8	15,0
1-15 de Junho		4,7	0,2	4,1	6,6	9,4
16-30 de Junho		4,0	0,0	3,1	5,9	9,2

Como se pode verificar pela tabela 5.4, a segunda quinzena de junho é a que apresenta os menores valores de WDT durante a instalação *offshore*.

Ainda que a segunda quinzena de junho se afigure mais vantajosa para a instalação *offshore*, a diferença para a primeira quinzena não é muito expressiva. Sabendo que se ambiciona otimizar não só o tempo de utilização dos recursos *offshore* como também o tempo de utilização dos cais do porto de Sines, iniciar os trabalhos na primeira quinzena de junho permite que os WFA permaneçam atracados no porto de Sines durante menos tempo. Dessa forma, o *hook-up* dos WFA será efetuado com maior brevidade do que se desse início à instalação *offshore* apenas na segunda metade do mês, o que levará a um encurtamento da duração total do projeto.

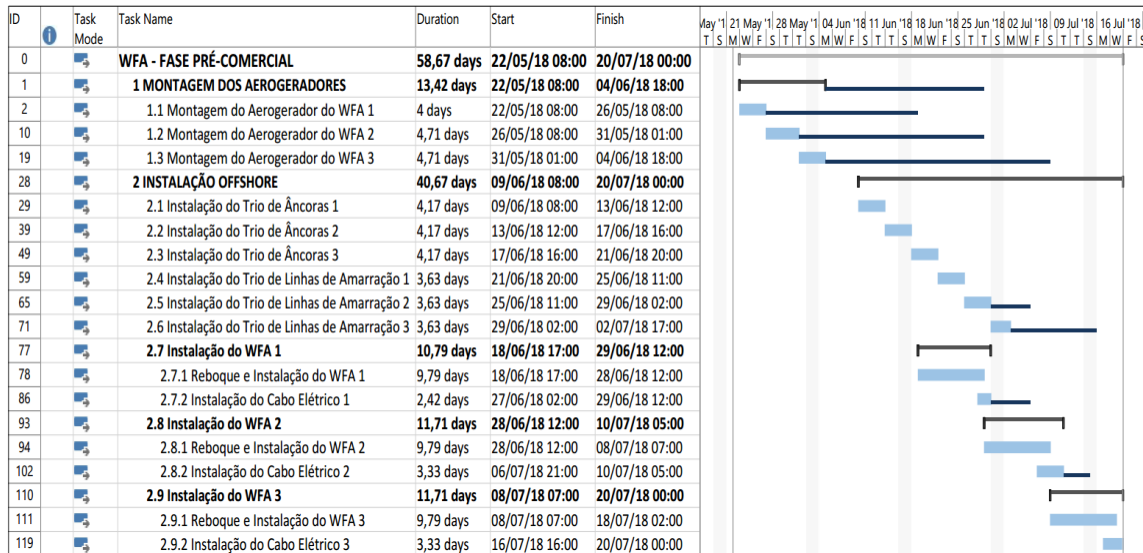
#### 5.2.2.1.1. Ponto de Compromisso

Estando identificados os períodos mais propícios para o início da montagem dos aerogeradores e da instalação *offshore*, falta apenas definir as datas para a mobilização dos recursos. Estas datas traduzem, no fundo, o ponto de compromisso alcançado para o projeto através da análise de sensibilidade efetuada anteriormente. Tendo chegado à conclusão que a montagem dos aerogeradores deverá ter início na primeira quinzena de maio e a instalação *offshore* na primeira quinzena de junho, estabeleceram-se as seguintes datas para a mobilização dos recursos:

- Mobilização da grua – 07/05/2018, às 08:00 h;
- Mobilização do navio 1 – 07/06/2018, às 08:00 h;

- Mobilização do navio 2 – igual à data de chegada do WFA 1 ao local de instalação com um *lead time* de 50h (em semelhança com o modelo de projeto – ver figura A.5).

O modelo de projeto representado, em modo sumário, na figura 5.1, passa assim a adotar o aspeto do modelo representado na figura 5.3:



**Figura 5.3 – Modelo de projeto sumário otimizado**

Este modelo, analogamente ao modelo que ilustra o plano base do projeto WFA, reproduz também um caso ideal de execução se não existir atraso na realização das atividades. A diferença entre ambos está apenas nas datas de mobilização fixadas para os recursos. Neste caso, as datas fixadas surgem na sequência do ponto de compromisso alcançado, o qual visou a otimização dos recursos face ao WDT expectável para o projeto. Os resultados obtidos através da análise de sensibilidade efetuada, apresentados nas quatro tabelas anteriores, comprovam que a seleção de datas para a mobilização dos recursos minimiza o impacto dessa incerteza e, consequentemente, os riscos do projeto. Ainda que o plano base seja aquele que possui menor duração determinística total, nele não estão considerados os períodos ótimos para a realização das atividades. O modelo de projeto exposto na figura 5.3 já tem isso em consideração, daí ser considerado como o modelo otimizado, pois será aquele que estará menos sujeito a um aumento substancial da sua duração devido a WDT. E ao ter menos WDT que afete a operabilidade dos recursos assignados, os custos associados aos mesmos irão igualmente diminuir.

### 5.2.2.2. Reordenamento das Atividades

Como relatado na secção 3.2.2.1, o reordenamento das atividades permite contornar a existência de WDT para uma determinada atividade que não pode ser realizada devido a condições meteorológicas adversas. Dessa forma, antecipa-se uma outra atividade que não está sob as mesmas restrições de modo a não ter um período de interrupção que atrasaria o desenvolvimento do projeto, o que permite otimizar a sua duração total através de uma maior rentabilização dos recursos.

Neste projeto, na sua primeira fase, consideraram-se como atividades a reordenar durante o processo de análise de risco as que são referentes à montagem dos aerogeradores 1 e 2 – o aerogerador 3 não terá qualquer reordenamento associado às suas atividades. Quando se dá o fim da montagem da *nacelle* do aerogerador 1, tanto se pode proceder à montagem da primeira pá como se pode dar início à montagem do aerogerador 2. Caso haja reordenamento, faz-se a montagem integral do aerogerador 2 e só depois se retorna à montagem das pás do aerogerador 1. Isso significa que sempre que haja reordenamento, a montagem do aerogerador 2 será sempre concluída antes da montagem do aerogerador 1. O único inconveniente em realizar esta ação está no facto de a grua ter de regressar ao cais 1 para poder concluir a montagem do aerogerador 1. Essa deslocação implica a adição de 5 h à duração da utilização da grua.

Na segunda fase do projeto consideraram-se como atividades a reordenar durante o processo de análise de risco as atividades com ROV (*remotely operated underwater vehicle*) dentro de cada mobilização do navio 1, isto é, em cada saída do navio 1 para o local de instalação. Olhando para o modelo de projeto apresentado no anexo B, as únicas atividades com ROV que podem ser reordenadas dentro de cada mobilização do navio 1 são as referentes à instalação dos trios de âncoras 1, 2 e 3. Todas as outras atividades que compõem a instalação *offshore* não terão qualquer reordenamento associado. Nesta situação, o navio 1, depois de instalar a primeira âncora de um determinado trio, tanto pode realizar a sondagem da âncora instalada por ROV como pode instalar a âncora seguinte. Se se confirmar o reordenamento, o navio instala o trio de âncoras por inteiro e só depois executa a sondagem individual de cada âncora por ROV.

Para ambas as fases é necessário impor uma condição para a existência de reordenamento. Essa condição é caracterizada por um número máximo de horas de espera devido a WDT por parte dos recursos alocados, sem que seja benéfico reordenar a

atividade. Ou seja, se na primeira fase detetar-se um WDT igual ou superior a X h aquando do início da montagem da primeira pá do aerogerador 1, cancela-se essa operação e a grua inicia a montagem do aerogerador 2. Se na segunda fase detetar-se um WDT igual ou superior a Y h aquando da sondagem da primeira âncora por ROV, cancela-se essa operação e o navio 1 inicia a instalação da segunda âncora. Caso o WDT previsto for inferior ao valor estabelecido, espera-se então por condições ambientais favoráveis à realização da atividade.

Achar as incógnitas X e Y deriva de um conjunto de simulações considerando diferentes números máximos de horas de espera devido a WDT. A simulação que retornar os menores valores para a duração da montagem dos aerogeradores e da instalação *offshore* será aquela que ditará a condição para o reordenamento das atividades. Atendendo às particularidades de cada uma das fases, arbitrou-se para a montagem dos aerogeradores um WDT máximo de 6, 12, 24, 36 e 48 h (incógnita X), e para a instalação *offshore* arbitrou-se um WDT máximo de 1, 2, 3, 4 e 5 h (incógnita Y).

Na tabela 5.5 está apresentada a duração expectável da montagem dos aerogeradores na primeira quinzena de maio para os valores arbitrados:

**Tabela 5.5 – Duração expectável da montagem dos aerogeradores na primeira quinzena de maio para um WDT máximo de X h**

WDT máximo [h]	Duração [dias]									
	Sem Reordenamento					Com Reordenamento				
	Média	P10	P50	P75	P90	Média	P10	P50	P75	P90
6	20,5	15,7	19,7	23,2	26,5	20,2	15,4	19,2	22,9	26,4
12						19,9	15,3	18,9	22,4	26,1
24						19,8	15,3	18,8	22,4	25,8
36						19,7	15,3	18,7	22,0	25,6
48						19,7	15,3	18,7	22,2	25,5

Como se pode apurar pela tabela 5.5, existe vantagem em fazer o reordenamento das atividades, conseguindo-se poupar algum tempo de trabalho em todos os casos. À medida que o número máximo de horas de espera devido a WDT aumenta até às 36 h,

nota-se uma ligeira diminuição da duração da montagem dos aerogeradores. No entanto, nota-se também que quando o WDT máximo passa das 36 h para as 48 h, a diferença entre indicadores estatísticos estabiliza e já é praticamente irrelevante. Isso significa que à medida que se vai aumentando o número máximo de horas de espera devido a WDT, os valores obtidos irão aproximar-se dos valores sem reordenamento. Nesse sentido, considera-se então como condição para o reordenamento o menor valor de WDT que possui a menor duração para a maioria dos indicadores estatísticos, neste caso o valor de 36 h ( $X = 36$  h).

Na tabela 5.6 está apresentada a duração expectável da instalação *offshore* na primeira quinzena de junho para os valores arbitrados:

**Tabela 5.6 – Duração expectável da instalação *offshore* na primeira quinzena de junho para um WDT máximo de Y h**

WDT máximo [h]	Duração [dias]									
	Sem Reordenamento					Com Reordenamento				
	Média	P10	P50	P75	P90	Média	P10	P50	P75	P90
1	43,6	40,7	43,1	45,1	47,3	43,4	40,7	42,9	44,8	47,0
2						43,4	40,7	42,8	44,8	46,9
3						43,4	40,7	42,8	44,8	47,0
4						43,4	40,7	42,9	44,8	47,0
5						43,4	40,7	42,8	44,8	46,9

Como se pode apurar pela tabela 5.6, mesmo que pouco significativa existe vantagem em fazer o reordenamento das atividades, conseguindo-se poupar algum tempo de trabalho em todos os casos. Esta pequena diferença é fruto do facto de as durações das atividades que podem ser alvo de reordenamento serem muito pequenas. Além disso, o WDT em si, durante esta fase, adota valores reduzidos, tal como ficou demonstrado na tabela 5.4. À medida que o número máximo de horas de espera devido a WDT aumenta até às 5 h, a diferença entre indicadores estatísticos é quase nula. Nesse sentido, considera-se então como condição para o reordenamento o menor valor de WDT que possui a menor duração para todos os indicadores estatísticos, neste caso o valor de 2 h ( $Y = 2$ h).



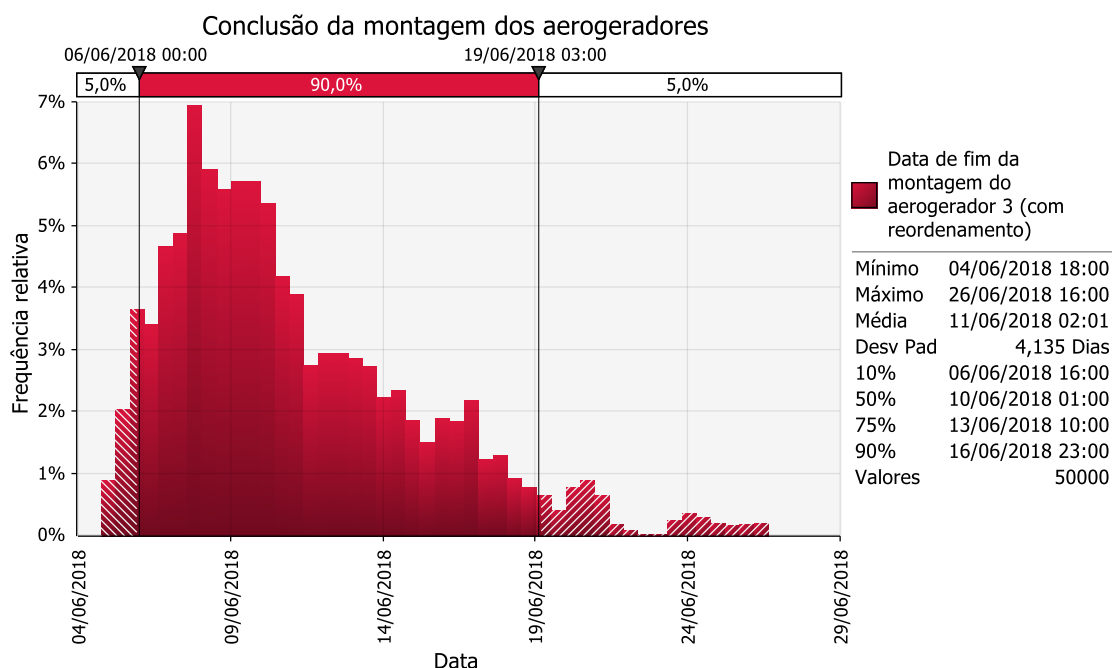
## 5.3. Simulação de Monte Carlo Final

### 5.3.1. Apresentação dos Resultados

Estando identificadas todas as incertezas, o modelo de risco está pronto a ser simulado. Nesta secção são apresentados os resultados obtidos para os principais *outputs* do projeto WFA. Para mais detalhe ao nível das datas de fim, durações e WDT expectáveis para os vários sumários de atividades presentes no modelo de projeto otimizado retratados na figura 5.3 consultar o anexo D.

#### 5.3.1.1. Montagem dos Aerogeradores

Na figura 5.4 encontra-se a data expectável para a conclusão da montagem do aerogerador 3 na respetiva plataforma, o que coincide com o fim do processo de montagem por parte da grua no porto de Sines:

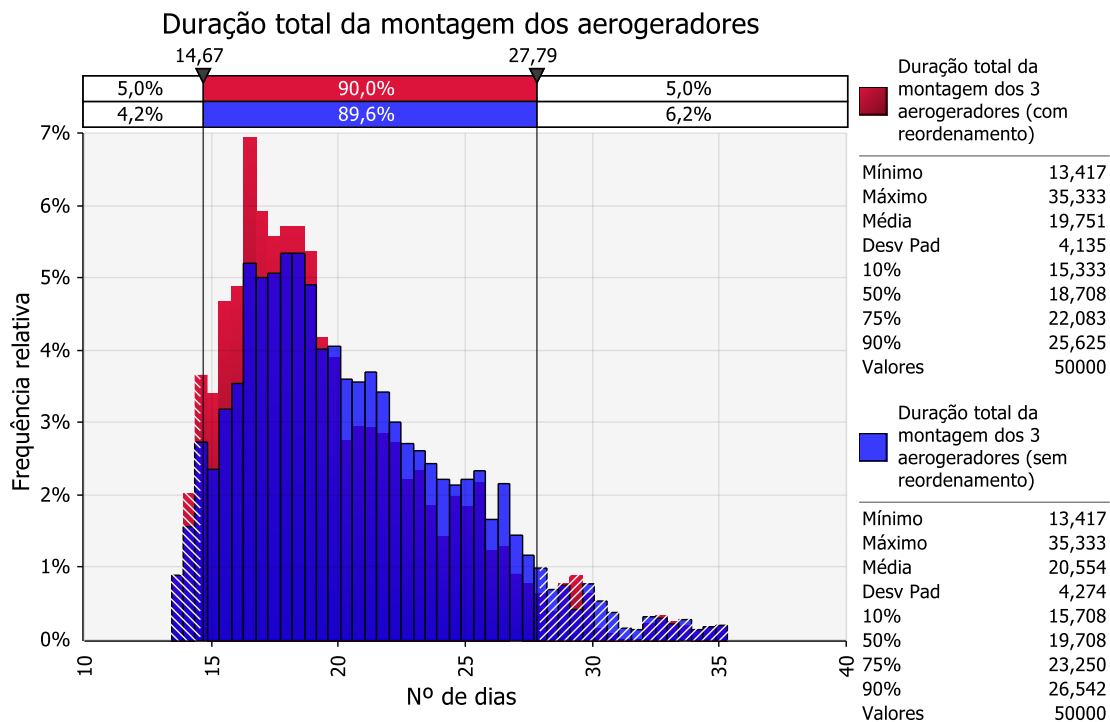


**Figura 5.4 – Conclusão da montagem dos aerogeradores**

Como se pode observar na figura 5.4, a data de fim mínima para a montagem dos aerogeradores corresponde à mesma data proveniente do modelo de projeto otimizado apresentado na figura 5.3, o que demonstra a possibilidade de ter WDT nulo durante todo o processo de montagem dos aerogeradores. No entanto, em média conclui-se a

montagem dos aerogeradores apenas no dia 11 de junho, mais 7 dias que o valor esperado pelo planeamento. De qualquer modo, este já era o valor de WDT previsto aquando da realização da análise de sensibilidade, o que assegura a veracidade dos valores obtidos (ver tabela 5.3).

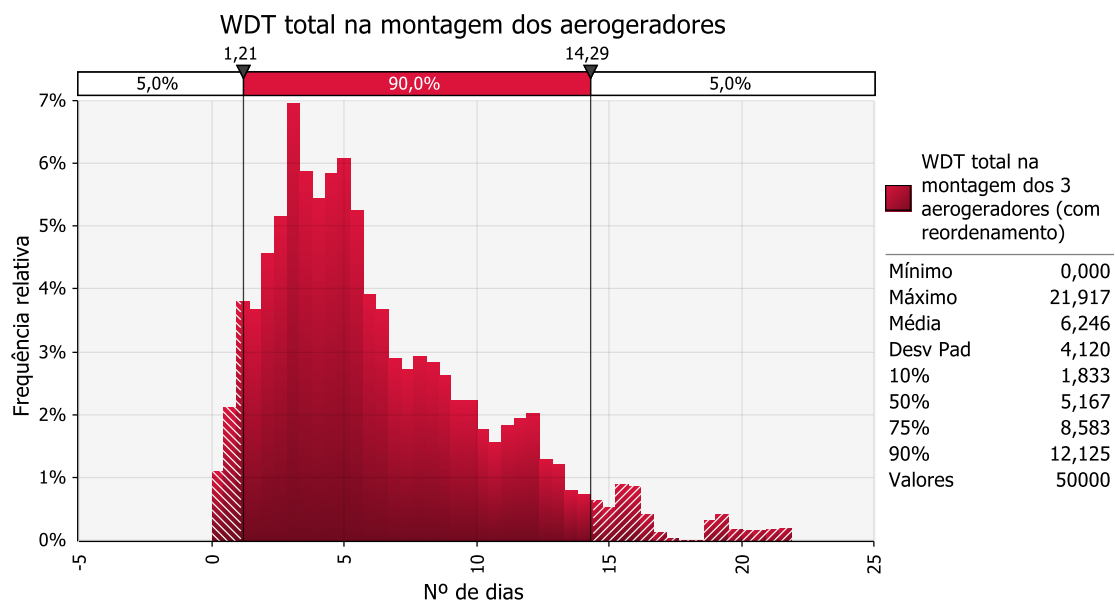
Na figura 5.5 está representada a duração total do processo de montagem dos três aerogeradores nas respetivas plataformas, com e sem reordenamento das atividades:



**Figura 5.5 – Duração total da montagem dos aerogeradores (com e sem reordenamento)**

Ao analisar a figura 5.5 é possível confirmar a duração que deriva do planeamento, ao ter-se como valor mínimo cerca de 13 dias no total. O P90 indica, por outro lado, aquando da existência de reordenamento das atividades, uma duração que poderá ir até ao dobro da duração mínima, ~26 dias, valor esse que está dentro do intervalo de confiança assumido (90%). Em média a duração total da montagem dos três aerogeradores ronda os 20 dias. Esta figura representa, no fundo, a análise de sensibilidade efetuada na secção 5.2.2.2 (ver tabela 5.5), o que permite atestar a vantagem em proceder com o reordenamento das atividades.

Na figura 5.6 está ilustrado o WDT total durante o processo de montagem dos três aerogeradores nas respetivas plataformas, o qual representa, também, o tempo de inoperação da grua devido a essa variável:

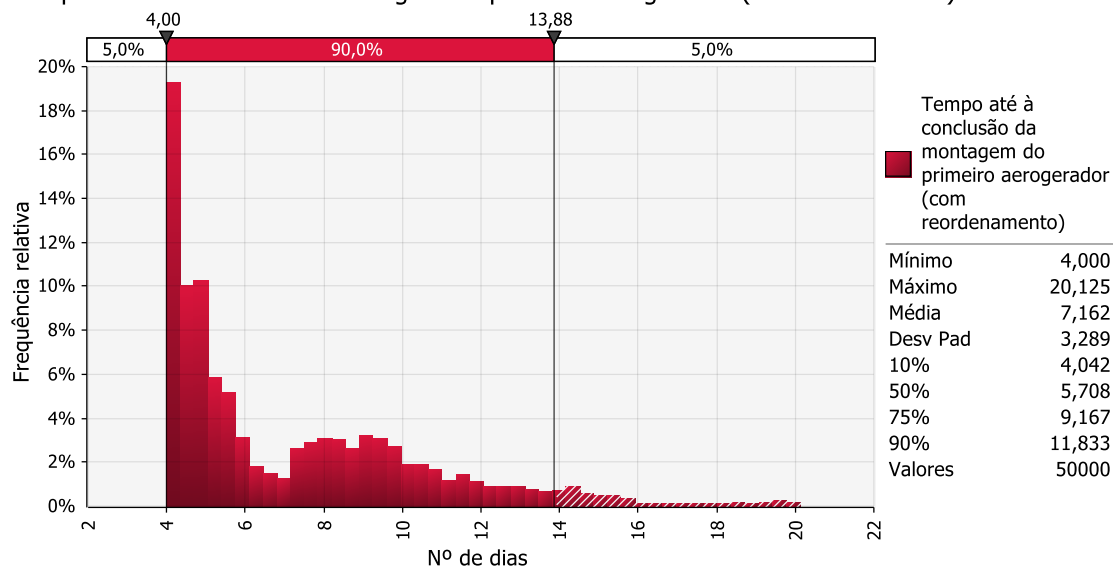


**Figura 5.6 – WDT total na montagem dos aerogeradores**

Atentando à figura 5.6 pode-se confirmar a existência, em média, de um WDT de ~6 dias. O P90, cujo valor é de aproximadamente 12 dias, confirma a duração dada na figura 5.5 pelo mesmo indicador: 13 dias de duração mínima + 12 dias de WDT = 25 dias de duração total. No máximo tem-se um WDT de ~22 dias, mas este está 8 dias acima do limite superior do intervalo de confiança (~14 dias).

Uma vez que sempre que se deteta um WDT igual ou superior a 36 h aquando do início da montagem da primeira pá do aerogerador 1 se procede ao reordenamento das atividades, na figura 5.7 está representado o tempo que a grua demora até concluir a montagem do primeiro aerogerador, podendo este ser o aerogerador do WFA 1 ou o aerogerador do WFA 2:

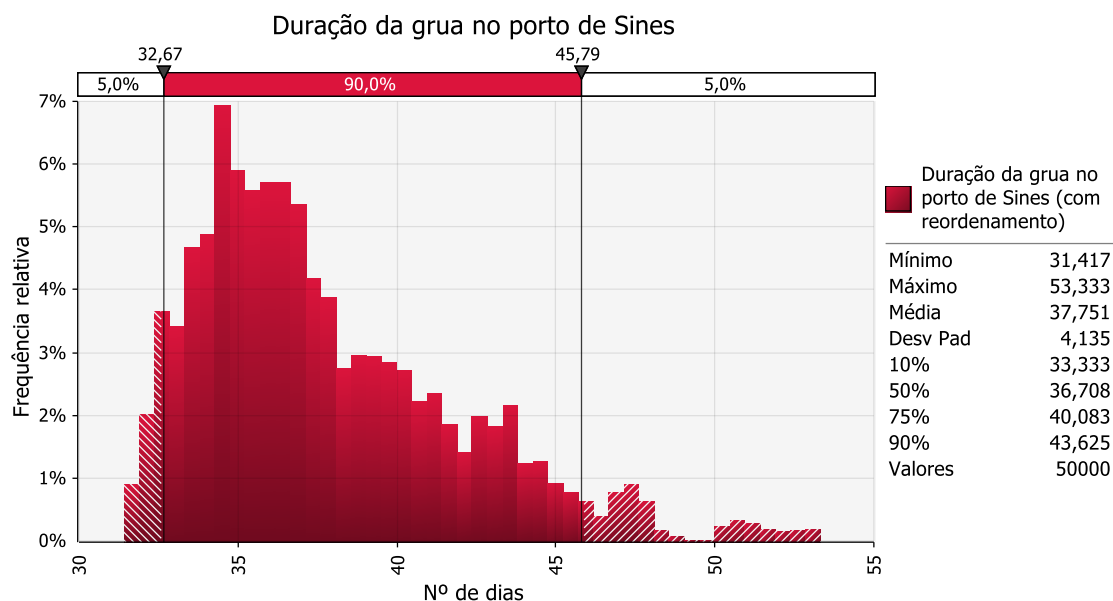
Tempo até à conclusão da montagem do primeiro aerogerador (WFA 1 ou WFA 2)



**Figura 5.7 – Tempo até à conclusão da montagem do primeiro aerogerador (WFA 1 ou WFA 2)**

É possível constatar na figura 5.7 que em média são precisos ~7 dias para a montagem do primeiro aerogerador, seja ele o do WFA 1 ou o do WFA 2. Porém, é bem visível a presença do pico máximo no valor mínimo indicado, 4 dias, o que significa que pelo menos em 19% das iterações efetuadas não existiu WDT.

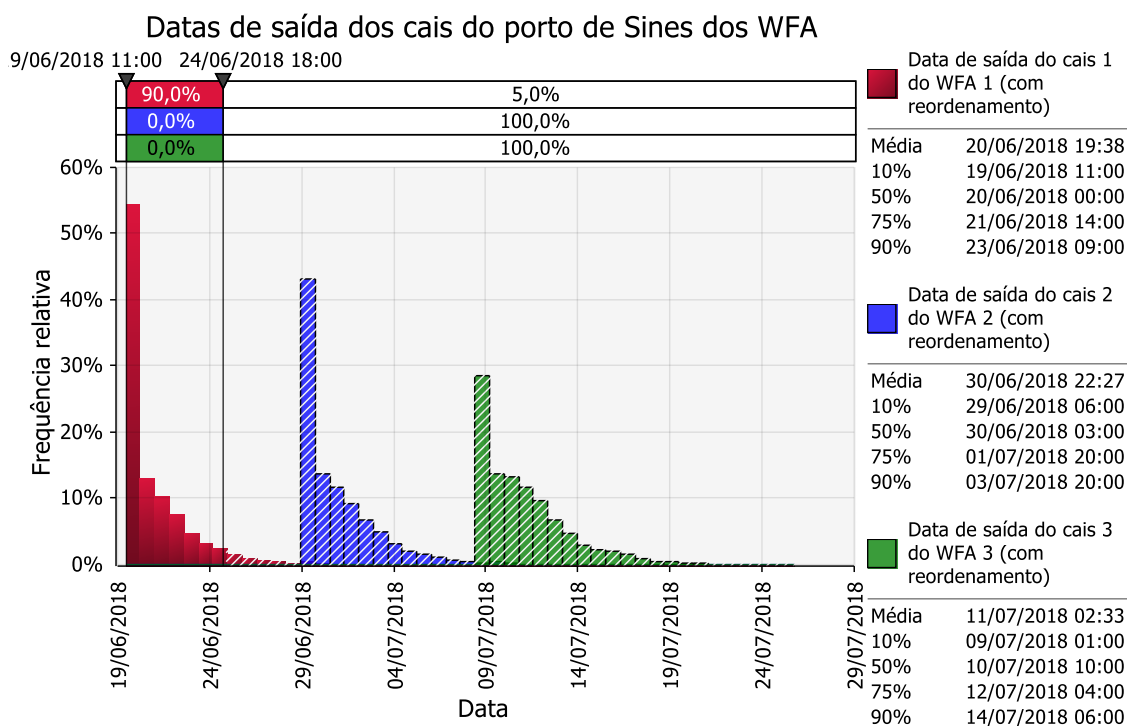
Na figura 5.8 exhibe-se a duração da grua no porto de Sines, isto é, o tempo que a grua permanece comissionada desde a sua mobilização:



**Figura 5.8 – Duração da grua no porto de Sines**

Através da figura 5.8 é possível constatar que a grua está comissionada, em média, cerca de 38 dias. Este valor deriva não só do processo de montagem, que está comprometido devido à existência WDT, mas também da fase preliminar que antecede esse mesmo processo. Mobilizar a grua, montá-la e descarregar os componentes dos aerogeradores resulta em quase 15 dias de trabalho, cerca de 40% da duração total. E se não se considerar o efeito do WDT, a fase preliminar ocupa quase 50% da duração total, visto que a grua tem uma duração mínima de, aproximadamente, 31 dias. Já o valor máximo gira em torno dos 53 dias, mais 22 dias que o valor mínimo.

Na figura 5.9 mostram-se as datas de saída dos WFA 1, 2 e 3 dos respectivos cais onde estiveram atracados, ou seja, as datas que definem o início da preparação e subsequente reboque dos dispositivos para Viana do Castelo:

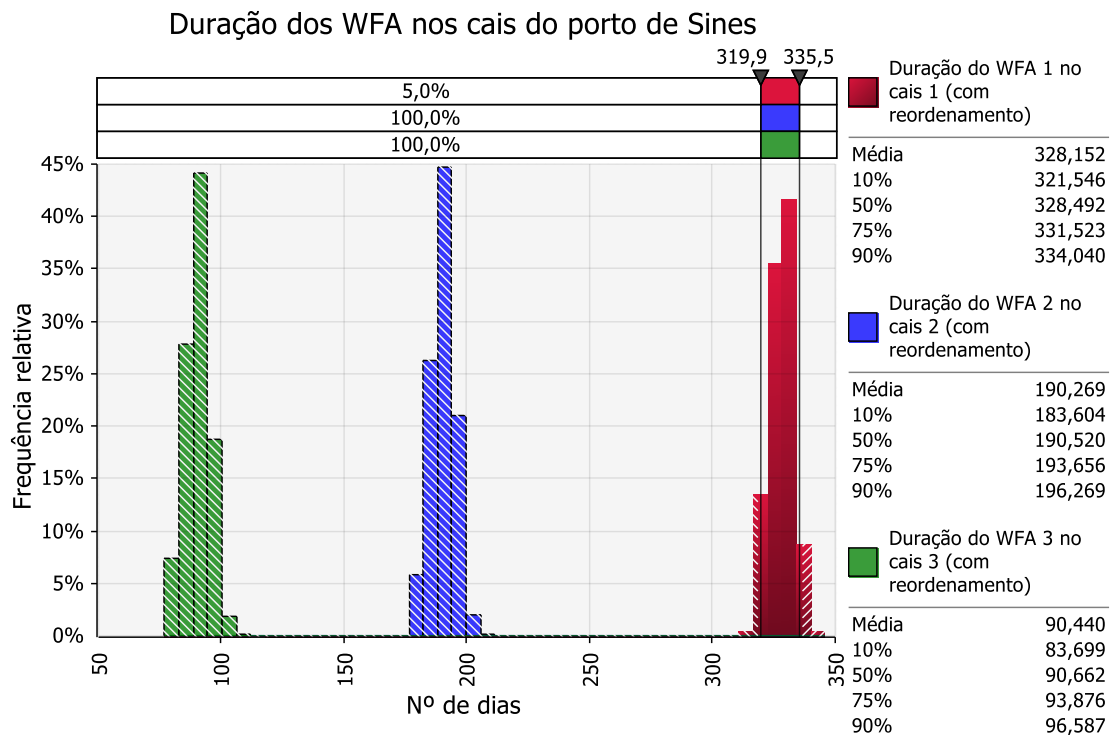


**Figura 5.9 – Data de saída dos cais do porto de Sines dos WFA**

É possível verificar na figura 5.9 uma configuração muito similar entre as distribuições das três datas de saída analisadas. Todas elas têm o pico máximo na data mínima de saída, o que significa que existe uma maior probabilidade em este indicador ser cumprido. Em média, o WFA 2 sai do porto de Sines ~10 dias depois da saída do WFA 1 e o WFA 3 sai ~11 dias depois da saída do WFA 2. Estes dias representam, em

suma, o tempo de preparação, reboque e *hook-up* dos WFA e ainda o tempo de regresso por parte dos rebocadores ao porto de Sines juntamente com o WDT associado.

Na figura 5.10 está ilustrada a duração dos WFA nos respetivos cais onde estiveram atracados, ou seja, o período que vai desde a chegada das plataformas ao porto de Sines até à sua saída para Viana do Castelo:

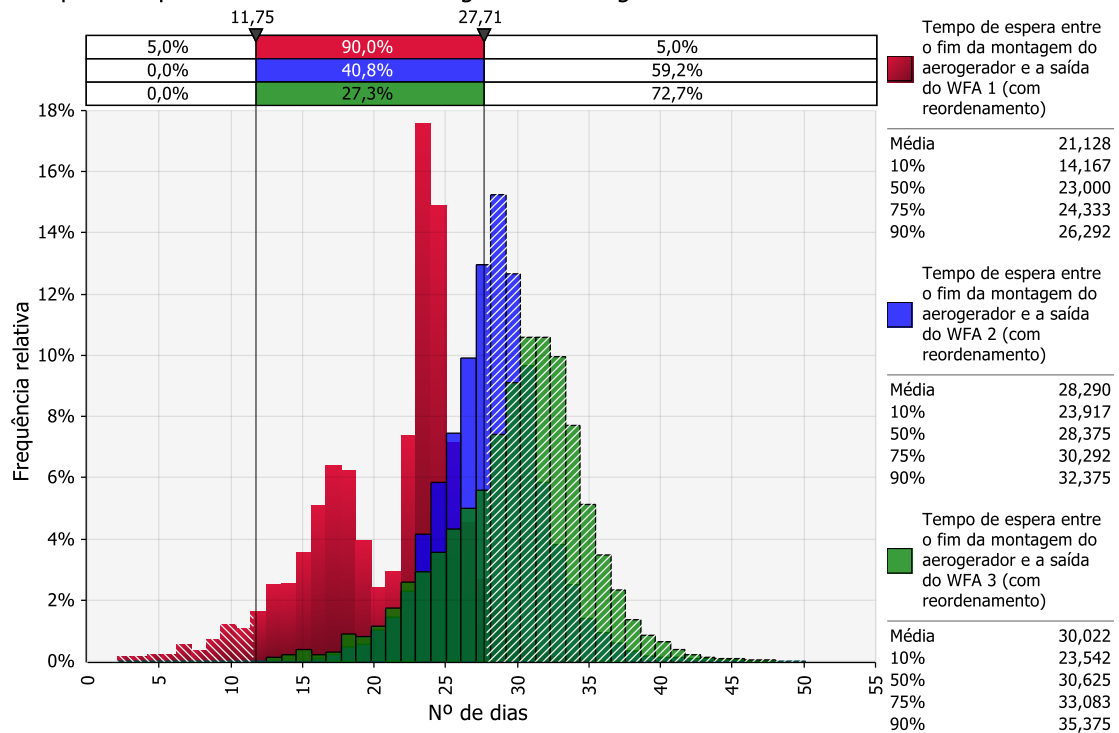


**Figura 5.10 – Duração dos WFA nos cais do porto de Sines**

É através da figura 5.10 que se consegue ter uma noção do real impacto da duração dos WFA nos cais do porto de Sines. Com as datas de chegada das três plataformas a assumirem as distribuições apresentadas na figura 5.2, o tempo que cada uma permanece atracada no porto de Sines adota valores bem distintos. O WFA 1 mantém-se atracado no porto de Sines cerca de 11 meses, sendo claramente o dispositivo com mais tempo de ocupação do respetivo cais. O WFA 2 surge em seguida com um tempo médio de permanência no porto de Sines de pouco mais de 6 meses e o WFA 3 surge em último lugar com um tempo de ocupação próximo dos 3 meses.

Por último, na figura 5.11 está assinalado o tempo de espera entre o fim da montagem dos aerogeradores nas respetivas plataformas até à sua saída do porto de Sines:

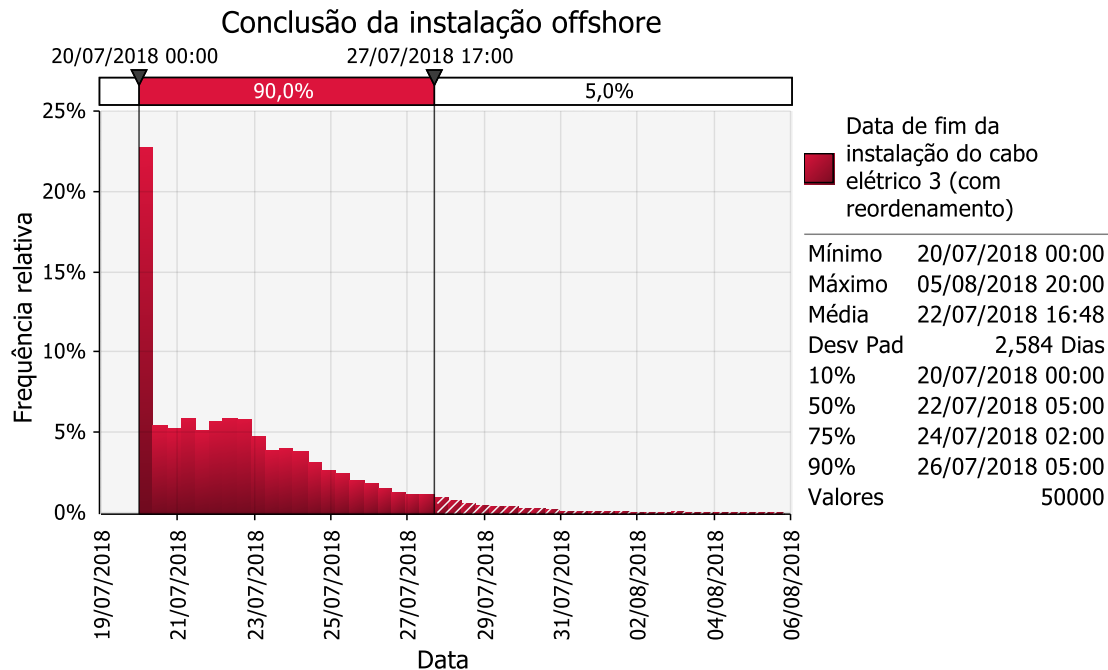
Tempo de espera entre o fim da montagem dos aerogeradores e a saída dos WFA

**Figura 5.11 – Tempo de espera entre o fim da montagem dos aerogeradores e a saída dos WFA**

A figura 5.11 ilustra bem a existência de reordenamento das atividades no processo de montagem dos aerogeradores. Quando existe reordenamento, o WFA 1 vê o seu tempo de espera entre o fim da montagem do respetivo aerogerador e a sua saída para Viana do Castelo encurtado. Isto acontece porque ao reordenar as atividades conclui-se a montagem do aerogerador 2 antes do aerogerador 1, daí o gráfico representado a vermelho apresentar uma forma tão singular. A parábola existente neste gráfico simboliza a interrupção da montagem do aerogerador 1. Quando há reordenamento o tempo de espera situa-se à esquerda da parábola e quando não há situa-se à direita. Como existe reordenamento com alguma frequência, o tempo de espera para o WFA 1 tende a diminuir para os vários indicadores estatísticos apresentados. O WFA 2 e o WFA 3 nunca têm o seu processo de montagem interrompido devido a reordenamento, daí apresentarem uma curva de distribuição mais comum e similar entre si.

### 5.3.1.2. Instalação *Offshore*

Na figura 5.12 encontra-se a data expectável para a conclusão da instalação do cabo elétrico 3, o que coincide com o fim do processo de instalação *offshore*:

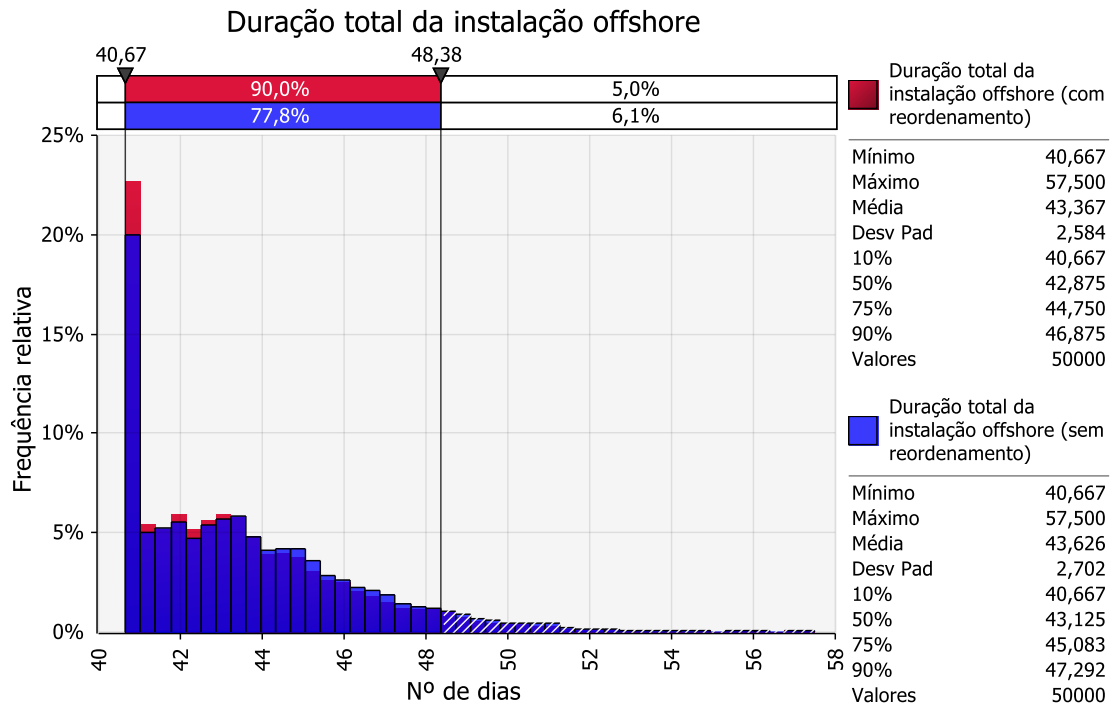


**Figura 5.12 – Conclusão da instalação *offshore***

Ao examinar a figura 5.12 consegue-se certificar que de facto o projeto WFA não se estende para o período de outono/inverno, não chegando sequer ao mês de setembro. Em média a instalação *offshore* termina ainda antes do fim de julho, no dia 22, e no máximo na primeira semana de agosto, no dia 5. Ao mobilizar o navio 1 no dia 7 de junho obtém-se um elevado pico no dia 20 de julho, entre os 20% e os 25%, o que indica que este é o dia mais provável para a conclusão do processo de instalação em Viana do Castelo. Este valor mínimo corresponde à mesma data proveniente do modelo de projeto otimizado apresentado na figura 5.3, o que demonstra a possibilidade de ter WDT nulo durante todo o processo de instalação *offshore*.

Na figura 5.13 está representada a duração total do processo de instalação *offshore*, com e sem reordenamento das atividades:

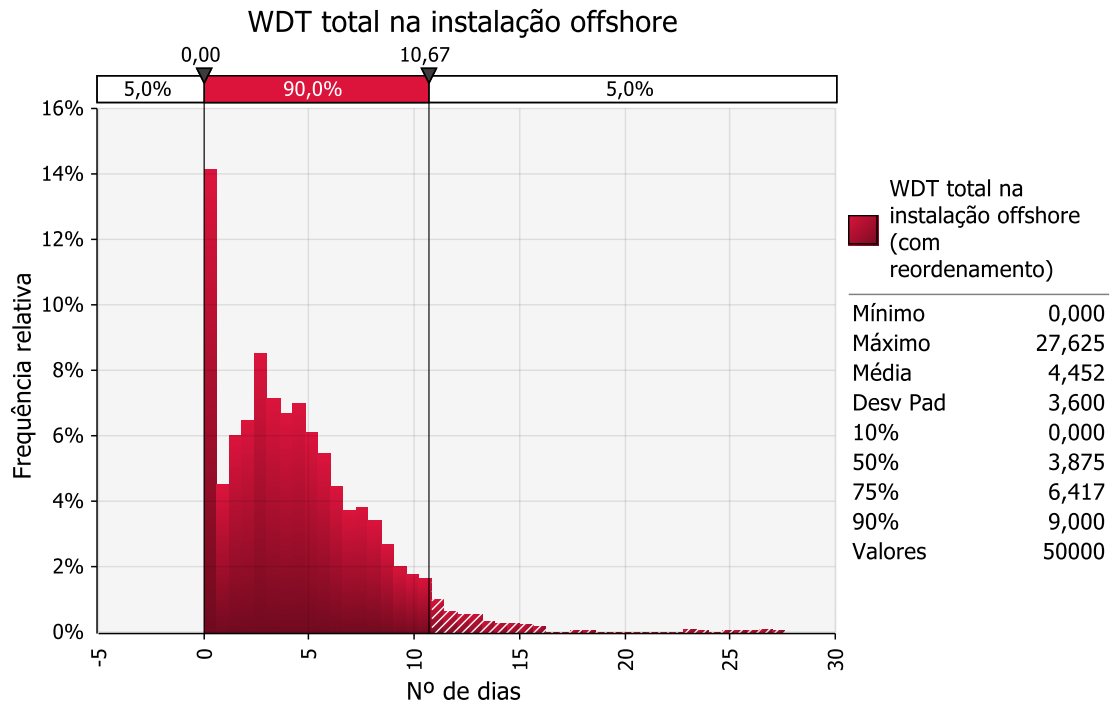




**Figura 5.13 – Duração total da instalação offshore**

Olhando para a figura 5.13 é possível confirmar novamente a existência de um pico entre os 20% e os 25%. A este pico está associada uma duração de aproximadamente 41 dias para o processo de instalação *offshore*. Segundo a simulação, em média a instalação *offshore*, aquando da existência de reordenamento das atividades, tem uma duração de ~43 dias, apenas mais 2-3 dias que o valor mínimo esperado. Esta figura representa, no fundo, a análise de sensibilidade efetuada na secção 5.2.2.2 (ver tabela 5.6), o que permite atestar a vantagem em proceder com o reordenamento das atividades.

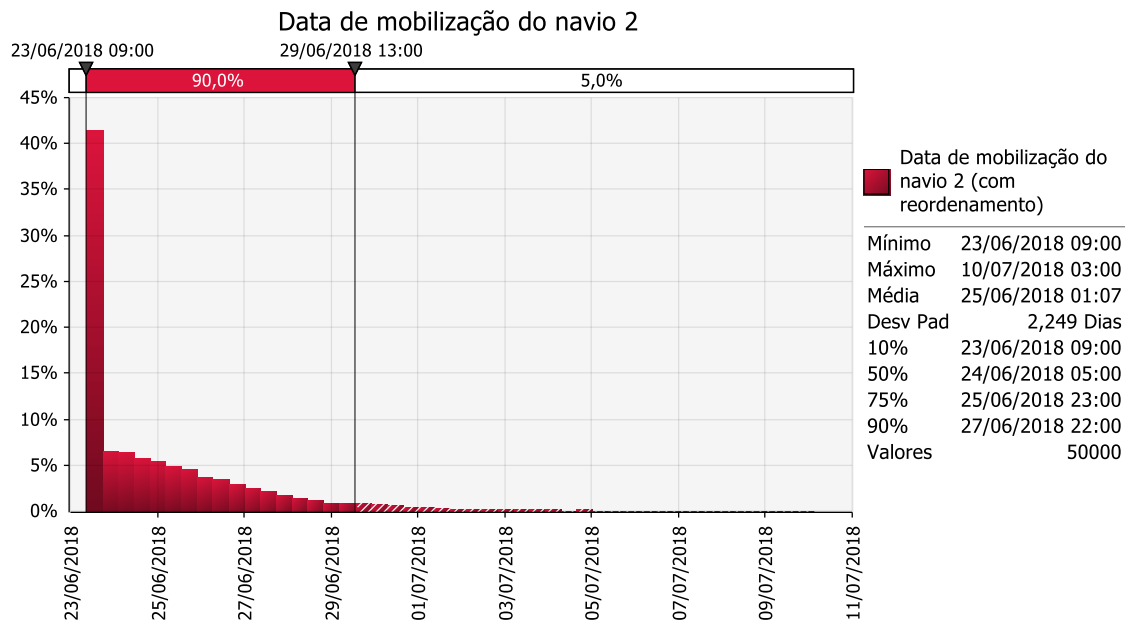
Na figura 5.14 está ilustrado o WDT total durante a instalação *offshore*, o qual representa, também, o tempo de inoperação conjunto do navio 1, do navio 2 e dos rebocadores 1 e 2 devido a essa variável:



**Figura 5.14 – WDT total na instalação *offshore***

Segundo a figura 5.14, existe a possibilidade de ter WDT nulo durante a instalação *offshore*, com uma probabilidade de ~14%. Em contrapartida, tem-se como valor máximo um WDT de aproximadamente 28 dias, mas este valor está bastante fora do intervalo de confiança, cujo limite superior se cinge aos 11 dias. A média indica um WDT de ~4 dias e o P90 indica um WDT de ~9 dias.

Visto que a data de mobilização do navio 2 é variável, estando dependente da data de chegada do WFA 1 ao local de instalação (o navio 2 é mobilizado 50 h antes da chegada do dispositivo), na figura 5.15 mostra-se a data prevista para a sua mobilização:



**Figura 5.15 – Duração da utilização do navio 1, do navio 2 e dos rebocadores 1 e 2**

Observando a figura 5.15, existe uma clara probabilidade, acima dos 40%, de o navio 2 ser mobilizado na data mínima prevista: 23 de junho. Em média a sua mobilização dá-se dois dias depois, no dia 25 de junho, e no máximo no início da segunda semana de julho, dia 10.

Na figura 5.16 estão representadas as durações de utilização do navio 1, do navio 2 e dos rebocadores 1 e 2. Para o navio 1 e navio 2, as respetivas durações mostram o tempo de utilização desde a mobilização até à desmobilização individual de ambos. Para os rebocadores 1 e 2, a respetiva duração mostra o tempo desde a primeira viagem para Viana do Castelo até ao terceiro e último regresso ao porto de Sines. Ilustrando:

## Duração da utilização do navio 1, do navio 2 e dos rebocadores 1 e 2

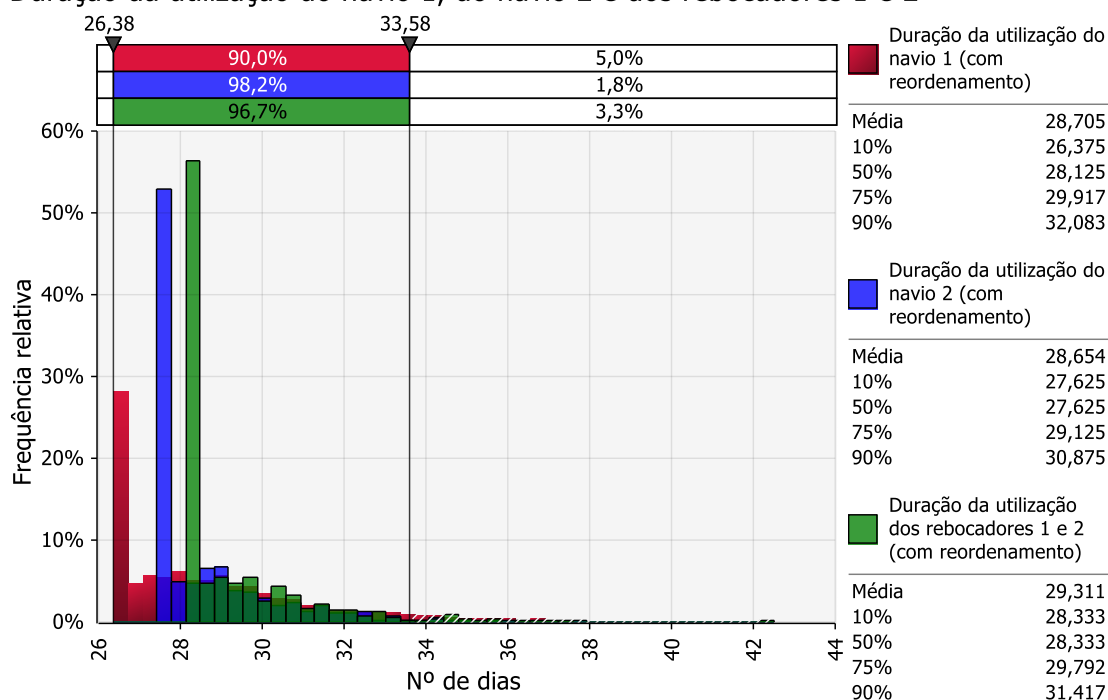


Figura 5.16 – Duração da utilização do navio 1, do navio 2 e dos rebocadores 1 e 2

Ao dissecar a figura 5.16, é possível notar um comportamento idêntico entre as distribuições representadas para o navio 2 e para os rebocadores 1 e 2. Este facto é bastante natural, pois os três recursos trabalham praticamente sempre durante o mesmo período. Existe um pico bastante elevado no valor mínimo (~29 dias) dos recursos em questão, estando ambos em torno dos 55%. O navio 1 possui também um pico no seu valor mínimo (~29 dias), mas este não é tão representativo como os outros dois, aproximando-se apenas dos 30%. Os dois navios e os dois rebocadores operam aproximadamente um mês cada um, o que significa que as duas fases da instalação *offshore* (instalação do sistema de âncoras e linhas de amarração e instalação dos WFA e dos cabos elétricos), já considerando a existência de WDT, admitem o mesmo peso na sua duração total. De notar que o WDT dos rebocadores não é um custo para o projeto, pois estes são mobilizados localmente apenas se houver janela temporal. No entanto o atraso pode ter consequências, nomeadamente no tempo de espera do navio 2.

Finalmente, na figura 5.17 apresenta-se o tempo que o navio 2 tem de esperar pela chegada do WFA 2 e do WFA 3 a Viana do Castelo após a instalação do cabo elétrico 1 e do cabo elétrico 2, respetivamente:

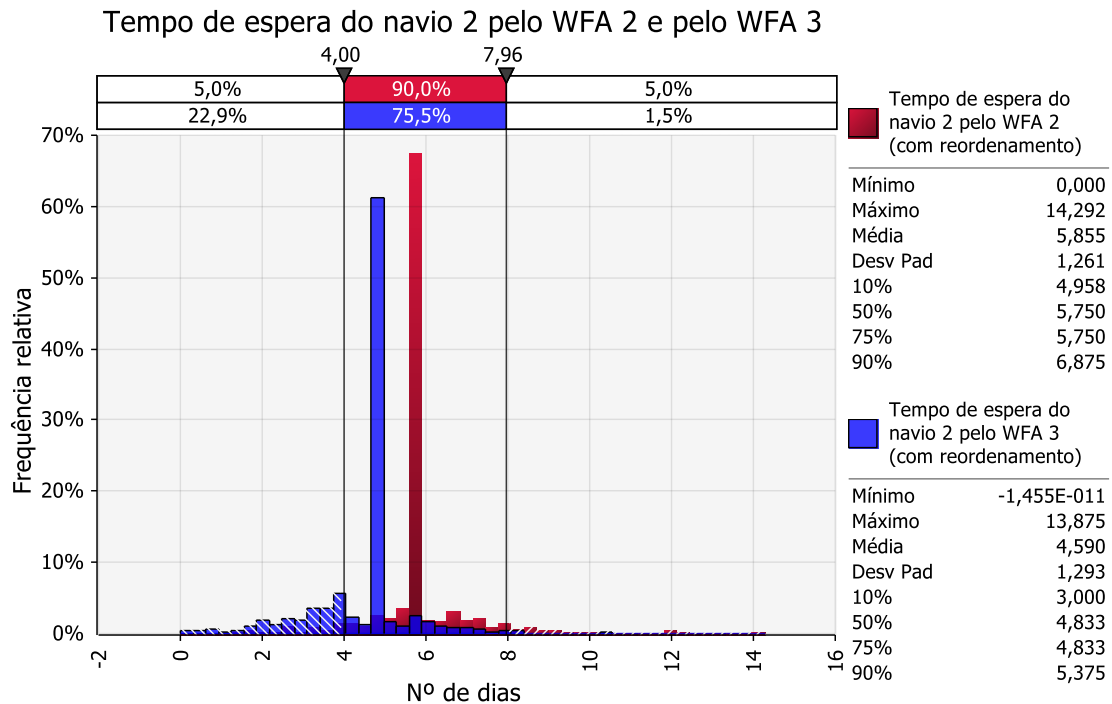


Figura 5.17 – Tempo de espera do navio 2 pelo WFA 2 e pelo WFA 3

Em oposição com o que acontece com o WFA 1, o navio 2 poderá ter obrigatoriamente de esperar pela chegada do WFA 2 e do WFA 3 ao local de instalação, tal como revela a figura 5.17. Com um formato equivalente, os dois gráficos apresentam um pico que vai acima dos 60% nos respetivos valores de moda (~5 dias para o WFA 2 e ~6 dias para o WFA 3). Este tempo de espera é motivado pelo tempo de viagem de regresso ao porto de Sines e consequente reboque para Viana do Castelo por partes dos rebocadores 1 e 2 ser superior ao tempo de instalação dos cabos elétricos por parte do navio 2.

### 5.3.2. Discussão dos Resultados

Contrariamente ao que era expectável no início do projeto, a instalação *offshore* provou ser a fase com menores probabilidades de ocorrência de WDT. Mesmo com as várias restrições meteorológicas que caracterizam esta fase, obtiveram-se resultados que permitem delinear um planeamento à partida favorável e com fortes possibilidades de não derrapar em excesso. Os valores retornados pela simulação de Monte Carlo demonstram um WDT diminuto e com pouca influência no desempenho do projeto ( $WDT \approx 4$  dias

para a média e WDT  $\approx 9$  dias para o P90 – ver figura 5.14). Assim, a possibilidade de estabelecer a primeira quinzena do mês de junho como o período de referência para o início da instalação *offshore* é algo que deve ser tido fortemente em consideração aquando da realização efetiva do projeto.

Por outro lado, a montagem dos aerogeradores não se figurava inicialmente tão submetida à existência de WDT quando comparada à fase que lhe sucede. Há, todavia, que salientar que esta fase foi antecipada em sequência da primazia dada à instalação *offshore*. O mês aparentemente mais favorável para a montagem dos aerogeradores seria agosto, mas a verdade é que se dá início a este processo três meses antes, em maio. Ainda assim, mesmo com uma maior probabilidade de existir mais WDT, os valores obtidos para esta fase não são desapropriados (WDT  $\approx 6$  dias para a média e WDT  $\approx 12$  dias para o P90 – ver figura 5.6).

Evidentemente que quanto menor o WDT maior será a redução dos custos associados à utilização da grua. Mas, tal como já foi mencionado, ao mobilizar a grua mais cedo, neste caso no dia 7 de maio, consegue-se não atrasar a instalação *offshore*. A mobilização do navio 1 um mês mais tarde, no dia 7 de junho, dá margem suficiente para que a montagem dos aerogeradores não se cruze com a segunda fase do projeto WFA. Para verificar isso mesmo, basta comparar as datas de fim da montagem dos aerogeradores com as datas de fim da instalação dos respetivos trios de linhas de amarração e verificar que estas nunca colidem (ver tabela A.2). Logo, com base na calendarização proposta para a mobilização dos recursos, o início da instalação dos WFA nunca irá sofrer atraso devido à montagem dos aerogeradores nas respetivas plataformas não estar consumada.

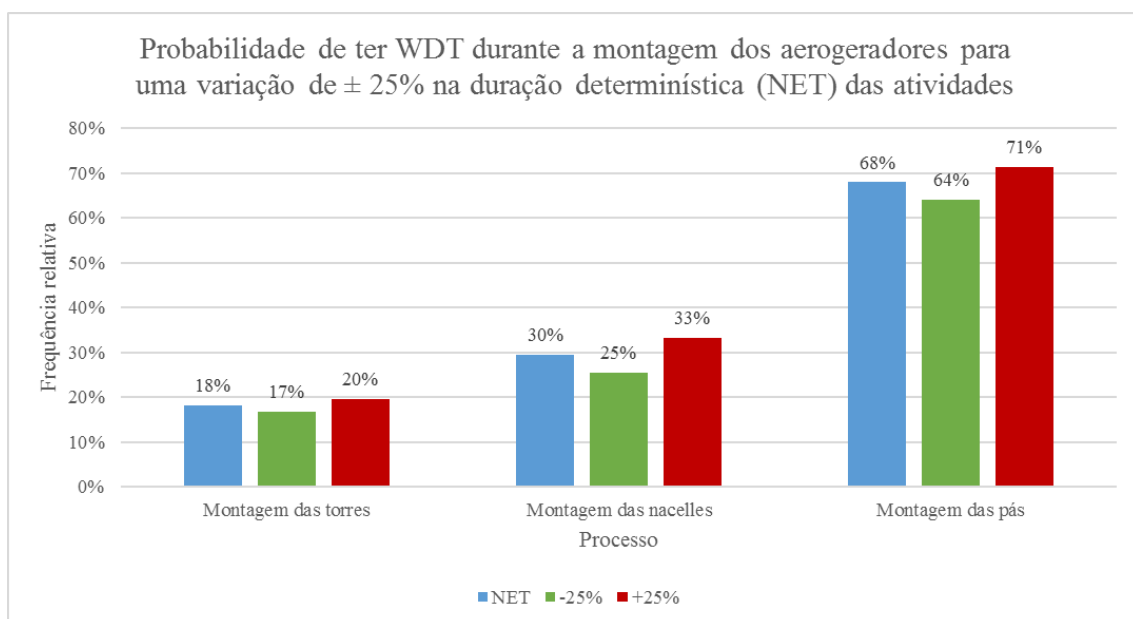
Apesar de a montagem dos aerogeradores poder derrapar sem que isso tenha impacto na instalação *offshore*, esta fase tem ainda alguns pontos de otimização. Um aspeto que pode ajudar nesse processo é a formalização de um contrato de trabalho que seja mais flexível e que permita ajustar o horário de laboração de acordo com as atividades a executar e/ou as previsões meteorológicas.

Uma vez que se pretende mobilizar apenas uma equipa com base em 12 h de trabalho diárias seguidas de 12 h de paragem, se se estabelecer, em alternativa, um horário com uma maior capacidade de adaptação às circunstâncias do projeto, as possibilidades de maximizar a utilização da grua serão reforçadas. Por exemplo, após a conclusão da montagem das duas primeiras secções da torre do aerogerador 1, e assumindo que não

haverá WDT, a terceira e última secção da torre, cuja duração é de 6 h, irá preceder a montagem da *nacelle*, cuja duração é de 12 h. Isso significa que depois de montar as duas primeiras secções (6 h + 6 h) ter-se-ão 12 h de intervalo até dar início à montagem da terceira secção. No entanto, como a montagem da *nacelle* tem uma duração de 12 h, a grua terá de parar novamente após a montagem da terceira secção para que não se trabalhem 18 h consecutivas (6 h + 12 h). Se isto se puder contornar atribuindo à grua a capacidade de trabalhar até 18 h em vez das 12 h iniciais, conseguir-se-ia intensificar o desempenho da mesma tornando-a um recurso mais eficiente.

Revisitando a figura 5.8 e os comentários subsecutivos, é possível recordar o tempo que a grua estará mobilizada e quais os fatores que nele têm mais impacto. O tempo de permanência deste recurso no porto de Sines é justificado pela duração individual de cada atividade, sendo que a fase preliminar que antecede a montagem dos aerogeradores possui grande relevância. Apesar de as durações serem consideradas variáveis determinísticas, estas ainda estão longe de na fase de planeamento atual estarem bem definidas. Se se conseguisse aliar a formalização de um contrato mais flexível com uma maior clarificação das durações das atividades, a utilização da grua poderá ser ainda mais otimizada.

Na figura 5.18 está ilustrada a probabilidade de ter WDT durante a montagem dos aerogeradores para uma variação de  $\pm 25\%$  na duração determinística (NET) das atividades:



**Figura 5.18 – Probabilidade de ter WDT durante a montagem dos aerogeradores para uma variação de  $\pm 25\%$  na duração determinística (NET) das atividades**

No desenvolvimento da figura 5.18 consideraram-se apenas os meses de maio e junho, pois é em maio que a grua é mobilizada e é em junho que a montagem dos aerogeradores é concluída. Como se pode apurar, uma variação de apenas  $\pm 25\%$  nas durações utilizadas no modelo de risco dá origem a que hajam alterações pertinentes na probabilidade de existir WDT durante a fase em questão. Desta forma, é importante esclarecer quais as durações efetivas das atividades de modo a conceber um planeamento mais próximo da realidade.

Já se verificou que a fase preliminar envolvendo a grua assume grande parte da responsabilidade na duração da sua utilização. Como consequência, se logisticamente for exequível alternar o processo de descarregamento dos componentes dos aerogeradores com o processo de montagem em si, provavelmente conseguir-se-ia minimizar o tempo que grua permanece mobilizada.

Segundo o plano base, cada descarregamento tem uma duração de 24 h, o que resulta em dois dias de trabalho. Admitindo que se consegue fazer uma previsão exata das condições de vento para 48 h, a grua poderia fazer o descarregamento dos componentes faseadamente. Ou seja, a grua começava por fazer o descarregamento das torres e das *nacelles*, os primeiros componentes dos aerogeradores a serem montados, e quando este terminasse, se a previsão meteorológica confirmasse a ausência de WDT, a grua começava a montagem das mesmas antes de descarregar as pás. E visto que se têm três aerogeradores, a grua poderia fazer o descarregamento individual dos respetivos componentes de acordo com o estado do tempo.

Basicamente, esta alternativa ao plano base permitiria seguir a mesma lógica de reordenamento das atividades, mas numa perspetiva ainda mais abrangente. Consoante a previsão de WDT, a grua realizaria diferentes atividades com o intuito de maximizar a sua utilização. Mesmo que isso implicasse a sua deslocação pelos diferentes cais do porto de Sines, viu-se na tabela 5.5 **Tabela 5.5** que a existência de reordenamento entre os aerogeradores 1 e 2 permite poupar um dia de trabalho. Se a possibilidade de reordenamento for alargada às atividades da fase preliminar, poder-se-á poupar ainda mais tempo de utilização da grua, o que levaria a uma redução dos custos inerentes.

Algo que realmente não se consegue contrariar neste projeto é o tempo de espera do navio 2 pela chegada do WFA 2 e do WFA 3 ao local de instalação. Ainda que este recurso proceda à execução de algumas atividades (instalação do cabo elétrico 1 e do cabo elétrico 2) enquanto os rebocadores regressam ao porto de Sines para transportar os



dispositivos em causa para Viana do Castelo, o navio 2 terá de aguardar, em média, 6 dias pelo WFA 2 e 5 dias pelo WFA 3 (ver figura 5.17). Isso resulta num tempo de inoperação não motivado por WDT que trará custos desnecessários para o projeto, visto que o navio 2 estará mobilizado, mas sem realizar qualquer trabalho.

Como alternativa a este facto, na presente fase de planeamento deve-se ponderar se é ou não viável e até mais oportuno utilizar apenas um em vez de dois navios para a instalação *offshore*. Apesar de ter como vantagem utilizar um navio para a instalação do sistema de âncoras e linhas de amarração e outro para o *hook-up* dos WFA e instalação dos cabos elétricos, no sentido em que se pode concluir o primeiro conjunto de atividades em paralelo com o início do segundo, ter apenas um navio pode ser ainda mais vantajoso.

Logo num primeiro momento, ao ter apenas um navio, logisticamente reduzem-se as dificuldades, pois só se terá de oficializar a mobilização de um recurso para a instalação *offshore*. Em seguida, ao ter um recurso inteiramente responsável por todo esse processo, será possível ter uma maior destreza na ordem da execução das atividades. Em particular, sabendo que só se poderá fazer o *hook-up* de um WFA depois de já estar instalado o respetivo trio de linhas de amarração, poder-se-á alterar o plano base da instalação *offshore* de modo a instalar o trio de linhas de amarração do WFA seguinte enquanto o seu reboque se processa. Ou seja, em vez de se instalarem os três trios de linhas de amarração depois de instalar o sistema de âncoras, instala-se cada trio individualmente entre os WFA. Exemplificando, vem pela figura 5.19 o seguinte:

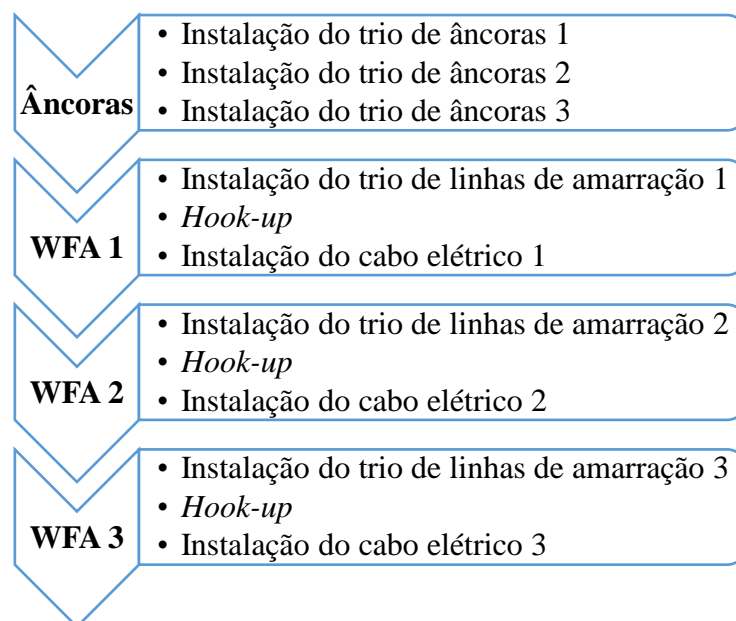
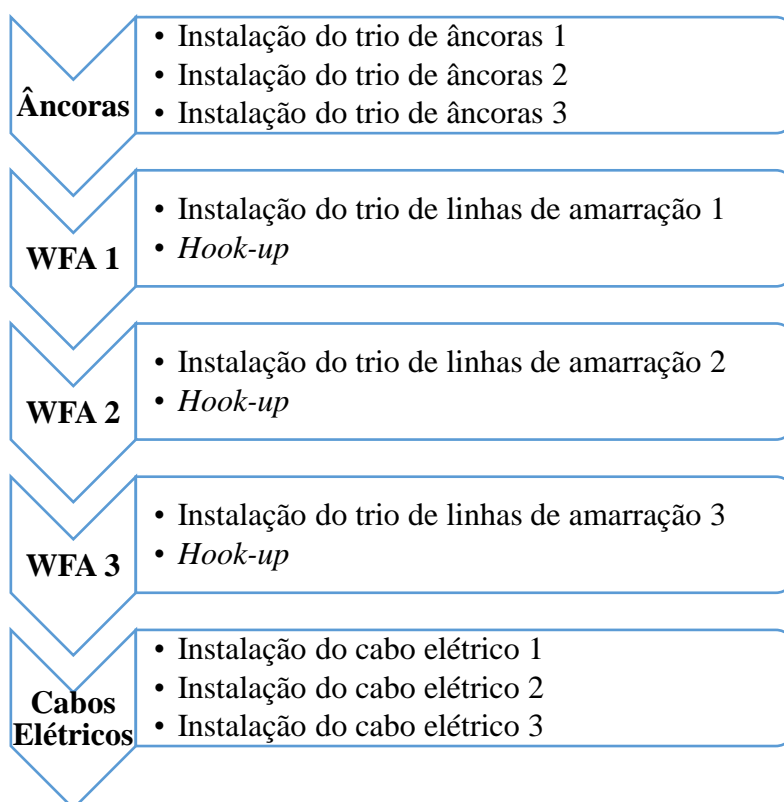


Figura 5.19 – Sequenciamento alternativo da instalação *offshore*

Com base no sequenciamento representado na figura 5.19, realizar-se-ia então a instalação do primeiro trio de linhas de amarração antes da chegada do WFA 1, e depois de concluído o seu *hook-up*, enquanto os rebocadores 1 e 2 vão ao porto de Sines e regressam a Viana do Castelo com o WFA 2, o navio instalaria o cabo elétrico 1 e o trio de linhas de amarração 2. O procedimento para o WFA 3 seria idêntico ao anterior. Com isto conseguir-se-ia que o navio não tivesse de esperar tanto tempo pelo WFA 2 e pelo WFA 3, o que contribuiria para a otimização da sua utilização.

No caso de ser estritamente necessário a utilização de dois navios durante a instalação *offshore*, uma outra alternativa possível seria a mobilização do navio 2 apenas para a instalação dos cabos elétricos. Para efetuar o *hook-up* dos WFA recorrer-se-ia apenas aos rebocadores 1 e 2, deixando assim de haver a necessidade de utilizar o navio 2. Exemplificando, vem pela figura 5.20 o seguinte:



**Figura 5.20 – Sequenciamento alternativo 2 da instalação *offshore***

Com base no sequenciamento representado na figura 5.20, o navio 1 faria a instalação dos três trios de âncoras e dos três trios de linhas de amarração, tal como consta no modelo de projeto, mas o *hook-up* dos WFA seria da responsabilidade exclusiva dos rebocadores 1 e 2. O navio 2 poderia então ser mobilizado mais tarde de modo a não ter

de esperar nem pelo WFA 2 nem pelo WFA 3, algo que se verifica seguindo o plano atual. No entanto, esta possibilidade teria como inconveniente o facto do WFA 1 só ser conectado mais tarde à rede elétrica, o que atrasaria o início da produção de energia. Além disso, iniciar a instalação dos cabos elétricos mais tarde poderá também levar à existência de mais WDT, pois esse conjunto de atividades poderá iniciar-se num período com condições meteorológicas menos favoráveis.

Nesta fase de planeamento também ainda não estão autenticados eventuais problemas para a permanência prolongada dos WFA já com os respetivos aerogeradores montados no porto de Sines. Atualmente, os efeitos a longo prazo que os aerogeradores poderão ter nas plataformas sem que estas já estejam ancoradas ao fundo do mar ainda não estão comprovados. Ainda assim, é importante quantificar, *a priori*, o tempo que esta mesma permanência poderá representar.

Recordando a figura 5.11, tem-se em média para os três WFA o seguinte tempo de permanência no porto de Sines já com respetivos os aerogeradores montados até à sua saída para Viana do Castelo:

- WFA 1 – 21 dias;
- WFA 2 – 28 dias
- WFA 3 – 30 dias.

Apesar de aparentemente elevados, estes valores representam o melhor cenário no contexto do WDT. Como já mencionado, fixaram-se como datas para a mobilização da grua e do navio 1 os dias 7 de maio e 7 de junho, respetivamente. Isso foi feito com o objetivo de tornar os recursos um menor alvo do impacto do WDT, não esquecendo, também, a intenção em otimizar o tempo de utilização dos cais do porto de Sines. Caso efetivamente se confirmem problemas relativamente a esta matéria, poder-se-á então mobilizar a grua mais tarde. Mobilizar a grua na segunda quinzena de maio, por exemplo, resultaria numa redução dos valores para estes três *outputs*. Porém, convém ter em atenção que esta ação poderá implicar um aumento significativo do WDT como demonstram os valores apresentados na tabela 5.3, devendo isso ser contabilizado para qualquer tomada de decisão.

Ainda que de se dê um maior relevo à otimização dos recursos como a grua e os navios de instalação *offshore*, os cais do porto de Sines têm também algum peso nos custos do projeto. Segundo a figura 5.2 a plataforma 1 e a plataforma 2 chegam ao porto

de Sines ainda no ano de 2017, o que significa que tanto o cais 1 como o cais 2 terão um longo período de utilização. A plataforma 3 chega provavelmente no início da segunda semana de abril do ano seguinte. Supondo que em 2018 a mobilização da grua se dá de facto na primeira quinzena de maio, em particular no dia 7, poder-se-ia pensar na possibilidade de adiar o início do fabrico das plataformas. Isso permitiria que as plataformas chegassem mais tarde ao porto de Sines e, como consequência, conseguir-se-ia minimizar os custos associados aos cais. Porém, a distribuição atual das datas de chegada das três plataformas permite ter uma alguma margem de segurança caso ocorra atraso na fase de fabrico. Logo, o custo dos cais do porto Sines, nesta situação, poderá ser negligenciado.

No que toca ao reordenamento das atividades, através da comparação efetuada na secção 5.2.2.2 foi possível constatar que a sua existência traz vantagens para o projeto WFA. Proceder ao reordenamento permite aumentar o desempenho ao nível das durações e subseqüentes datas de fim associadas tanto à montagem dos aerogeradores como à instalação *offshore*. Embora a diferença observada não seja uma diferença gritante que ateste com facilidade a otimização do projeto, esta possui suficiente representatividade que confirme e justifique esta inclinação para alterar o seu plano base em sequência dos cenários em que o mesmo estará inserido.

Os resultados do reordenamento apenas não foram ainda mais positivos e evidentes devido ao tipo de abordagem efetuada. Se se tivessem incluído mais trocas entre atividades, potenciar-se-iam, indiscutivelmente, os valores retornados. Além disso, se se impusessem mais condições para a existência de reordenamento, conseguir-se-ia controlar melhor a quantidade de WDT existente. Existem por vezes certas situações em que fazer o reordenamento dá origem a que haja mais WDT a longo prazo. Isto acontece porque em algumas das iterações efetuadas, aquando da troca de atividades, as *timestamps* envolvidas possuem um somatório de WDT mais elevado do que aquelas que estariam abrangidas se não se fizesse o reordenamento. Ao impor mais condições, nomeadamente através de um alargamento do número de atividades abrangidas, abarcar-se-ia um mais amplo conjunto de potenciais WDT, o que permitiria testemunhar com mais alguma facilidade a vantagem em proceder ou não com esta ação consoante o cenário analisado.

## 6. Considerações Finais

Ao longo desta dissertação foi retratado um caso real de planeamento da instalação de um parque eólico *offshore* através da realização de um processo quantitativo de análise de risco. Era o principal objetivo deste trabalho desenvolver uma metodologia que permitisse efetuar a modelação, análise e otimização da sequência de montagem, transporte e instalação do projeto WFA, tendo em conta a restrição dos recursos, a incerteza das condições meteorológicas e a duração das atividades.

Numa primeira fase, procedeu-se à elaboração de um caso de referência com o intuito de definir e testar a metodologia de análise a aplicar no projeto em estudo. Esta metodologia teve por base o método de análise de cenários, método esse que visava identificar e avaliar a incerteza inerente ao projeto, em particular o WDT. A metodologia implementada estava ainda orientada à possibilidade de reordenar certas atividades do plano base do projeto com o propósito de otimizar e, por conseguinte, maximizar o seu desempenho.

Numa segunda fase, procedeu-se à aplicação da metodologia de análise desenvolvida no projeto WFA. Primeiramente, realizou-se uma análise de sensibilidade de modo a encontrar o ponto de compromisso do projeto tendo em conta a otimização pretendida não só para os recursos alocados no contexto do WDT como também para o tempo em que as plataformas permanecem no porto Sines. Concluiu-se que a primeira quinzena de maio e a primeira quinzena de junho são os períodos mais adequados para dar início à montagem dos aerogeradores e à instalação *offshore*, respetivamente. Mais concretamente, fixaram-se como datas de mobilização o dia 7 de maio para a grua e o dia 7 de junho para o navio 1. Estas datas foram escolhidas criteriosamente por forma a

conseguir o melhor compromisso entre as diversas variáveis de saída, tendo-se efetivamente revelado, aquando da simulação de Monte Carlo final, como datas bastante favoráveis considerando as especificidades do projeto.

Convém notar que este projeto terá lugar apenas no ano de 2018, o que significa que até lá muitos detalhes serão esclarecidos e aprimorados, o que permitirá ter uma melhor noção de como processar o risco e, assim, definir um planeamento mais rigoroso. Tópicos como a duração das atividades, a ordem pela qual estas serão realizadas e as possibilidades existentes de reordenamento entre si, os períodos de laboração da grua e as datas de chegada das plataformas ao porto de Sines são apenas alguns dos exemplos que ao longo do tempo vão sendo clarificados. À medida que isso for acontecendo, será possível atualizar o modelo de risco e torná-lo alvo de novas simulações por forma a avaliar os cenários mais recentes para o projeto.

São várias as abordagens que se podem seguir num processo de análise de risco, sobretudo quando isso gira em torno da geração de *timestamps*. Na fase de implementação do projeto descrito (abordada no capítulo 5), optou-se por gerar, num primeiro momento, um conjunto mensal de *timestamps* e, num segundo momento, um conjunto quinzenal de *timestamps*. Essa segunda geração de *timestamps* tinha como objetivo alcançar uma maior precisão ao mesmo tempo que mantinha a capacidade de abranger um largo grupo de momentos no tempo. Consoante o estilo e os objetivos do gestor de projeto, tanto se pode seguir as duas abordagens exemplificadas como ser ainda mais contido e cingir a geração de *timestamps* a uma geração semanal ou até mesmo diária.

Seja qual for a abordagem adotada, a metodologia de análise desenvolvida pode ser aplicada. Dessa forma, como trabalho futuro poder-se-á, por exemplo, seguindo a mesma linha de análise seguida até aqui, estudar o risco recorrendo a uma geração de *timestamps* dos anos mais recentes focando em períodos mais curtos. Aliado a isso, podem-se também arbitrar diferentes datas para a mobilização dos recursos com o objetivo de verificar as datas de conclusão das várias fases e subfases do projeto e, por conseguinte, as suas durações e WDT totais, os busílis da otimização. Se nesse estudo forem igualmente incluídos os custos associados aos recursos, poder-se-á encontrar um ainda melhor ponto de compromisso para o projeto.

Como alternativa para trabalho futuro, como relatado na secção 3.2.3.1, pode-se também fazer uma previsão de séries temporais. Enquanto nesta dissertação se assumiu que o ano de 2018 pode ser caracterizado pelas mesmas condições meteorológicas

registadas em anos anteriores, poder-se-á tentar fazer uma previsão das condições meteorológicas expectáveis para esse mesmo ano. Isso permitirá ganhar algum conhecimento do que é mais provável de acontecer em 2018 e assim esboçar um planeamento que permita antecipar eventuais atrasos no projeto.

Esta questão da previsão de séries temporais prende-se ainda de certa forma com o que foi desenvolvido nesta dissertação. Apesar de o reordenamento das atividades não se ter revelado uma vantagem muito evidente, isso é fruto, tal como foi explicado anteriormente na secção 5.3.2, da abordagem efetuada. Ainda assim, foi possível observar na secção 5.2.2.2 que há otimização no que toca à duração tanto da montagem dos aerogeradores como da instalação *offshore*. Quando se der o início efetivo do projeto WFA, a possibilidade de reordenar atividades terá ainda mais impacto e as vantagens serão bem mais notórias. Partindo do pressuposto que se consegue fazer uma previsão exata das condições meteorológicas de pelos menos 48 h, este horizonte temporal permitirá aferir se de facto é ou não compensatório fazer o reordenamento. E se se incluírem mais possibilidades de troca do que aquelas que foram apresentadas neste documento, isso permitirá tirar um ainda maior proveito do trabalho desenvolvido.





## Referências

- [1] P. Valverde, *The WindFloat Project*, Torres Vedras: EDP Inovação, 2012.
- [2] A. Estanqueiro, “Energia Eólica Offshore - Levantamento do potencial do país, limitações e soluções tecnológicas,” em *Conferência Energia 2020*, Oeiras, 2009.
- [3] M. Rock e L. Parsons, “Offshore Wind Energy,” Carol Werner, Environmental and Energy Study Institute, 2010.
- [4] European Wind Energy Association, “Wind in power - 2014 European Statistics,” Brussels, 2015.
- [5] A. Ho e A. Mbistrova, “The European offshore wind industry - key trends and statistics 1st half 2015,” European Wind Energy Association, Brussels, 2015.
- [6] European Wind Energy Association, “Wind energy scenarios for 2020,” Brussels, 2014.
- [7] renewableUK, “Offshore Wind Project Timelines,” London, 2015.
- [8] European Wind Energy Association, “The European offshore wind industry - key trends and statistics 2014,” Brussels, 2015.
- [9] B. Silva, “A Engenharia Civil e a Produção Industrial de Energia Eólica,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [10] P. Valverde, *The WindFloat Atlantic Project*, Lisboa: EDP Inovação, 2014.

- [11] M. Collu, A. Kolios, A. Chabardehi e F. Brennan, “A comparison between the preliminary design studies of a fixed and a floating support structure for a 5 MW offshore wind turbine in the North Sea,” *Marine renewable and offshore wind energy*, pp. 63-74, 2010.
- [12] L. Castro-Santos e V. Diaz-Casas, “Sensitivity analysis of floating offshore wind farms,” *Energy Conversion and Management*, vol. 101, pp. 271-277, 2015.
- [13] “Wikimedia Commons,” 2012. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agucadoura\\_WindFloat\\_Prototype.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agucadoura_WindFloat_Prototype.jpg). [Acedido em 5 10 2015].
- [14] J. Jesus, “Aerogerador Offshore “WindFloat” - Estudo de Incidências Ambientais,” WindPlus. S.A., Linda-a-Velha, 2011.
- [15] International Organization for Standardization, *ISO 31000:2009, Risk management -- Principles and guidelines*, Geneva, 2009.
- [16] Project Management Institute, Inc., *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)*. -- Fifth edition, Atlanta: Book Editor, 2013.
- [17] Palisade Corporation, *User's Guide @RISK - Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft® Excel*, New York, 2015.
- [18] A. Syalim, Y. Hori e K. Sakurai, “Comparison of Risk Analysis Methods: Mehari, Magerit, NIST800-30 and Microsoft’s Security Management Guide,” em *International Conference on Availability, Reliability and Security*, Fukuoka, 2009.
- [19] C. Norris, J. Perry e P. Simon, “Project Risk Analysis and Management,” Association of Project Managers, High Wycombe, 2000.
- [20] P. K. Marhavilas, D. Koulouriotis e V. Gemeni, “Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 24, nº 5, pp. 477-523, 2011.
- [21] P. K. Marhavilas e D. E. Koulouriotis, “Developing a new alternative risk assessment framework in the work sites by including a stochastic and a deterministic process: A case study for the Greek Public Electric Power Provider,” *Safety Science*, vol. 50, nº 3, pp. 448-462, 2012.
- [22] P. K. Marhavilas e D. E. Koulouriotis, “The Deterministic and Stochastic Risk Assessment Techniques in the Work Sites: A FTA-TRF Case Study,” em *Risk Management for the Future - Theory and Cases*, Rijeka, InTech, 2012, pp. 51-66.

- [23] PM Knowledge Center, "Schedule Risk Analysis: How to measure your baseline schedule's sensitivity?," Operations Research - Applications and Solutions, [Online]. Available: <http://www.pmknowledgecenter.com/node/131>. [Acedido em 21 Janeiro 2016].
- [24] J. E. Kelley e M. R. Walker, "Critical-Path Planning and Scheduling," em *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, New York, 1959.
- [25] Ö. Ökmen, "A procedure for critical path method-based scheduling in linear construction projects," *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, vol. 55, nº 2, pp. 12-20, 2013.
- [26] D. Malcolm, J. Roseboom, C. Clark e W. Fazar, "Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation," *Operations Research*, vol. 7, pp. 646-669, 1959.
- [27] A. B. Tenera, "A Gestão do Risco de Derrapagem da Duração de Projectos," em *Risco, Segurança e Sustentabilidade*, Lisboa, Edições Salamanca, 2012, pp. 789-809.
- [28] A. B. Tenera, "Critical Chain Buffer Sizing: A Comparative Study," em *Proceedings of the PMI research conference*, Project Management Institute, Newton Square, 2008.
- [29] E. M. Goldratt, *Critical chain*, Great Barrington, MA, EUA: North River Press, 1997.
- [30] M. Vanhoucke, "Schedule Risk Analysis: Measuring the time sensitivity of an activity," Operations Research - Applications and Solutions, 12 Fevereiro 2011. [Online]. Available: <http://www.pmknowledgecenter.com/node/134>. [Acedido em 21 Janeiro 2016].
- [31] M. d. F. Miguens, *Probabilidades e Estatística C*, Setúbal: FCT-UNL, 2009.
- [32] D. T. Hulett, "Projects by Hulett & Associates," Hulett & Associates, [Online]. Available: [http://www.projectrisk.com/projects\\_by\\_hulett.html](http://www.projectrisk.com/projects_by_hulett.html). [Acedido em 9 10 2015].
- [33] A. M. Connor e S. G. MacDonell, "Stochastic cost estimation and risk analysis in managing software projects," em *14th International Conference on Intelligent and Adaptive Systems and Software Engineering (IASSE)*, Toronto, 2005.

- [34] I. Díaz-Empananza, “Is a Small Monte Carlo Analysis a Good Analysis? Checking the Size, Power and Consistency of a Simulation-Based Test,” *Statistical Papers*, vol. 43, pp. 567-577, 2002.
- [35] P. Pontrandolfo, “Project Duration in Stochastic Networks by the PERT-Path Technique,” *International Journal of Project Management*, vol. 18, pp. 215-222, 2000.
- [36] C. Diaz e F. Hadipriono, “Nondeterministic Networking Methods,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 119, n° 1, pp. 40-57, 1993.
- [37] X. Zheng e M. Liu, “An overview of accident forecasting methodologies,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, n° 4, pp. 484-491, 2009.

Anexo A – Ajuste das Distribuições

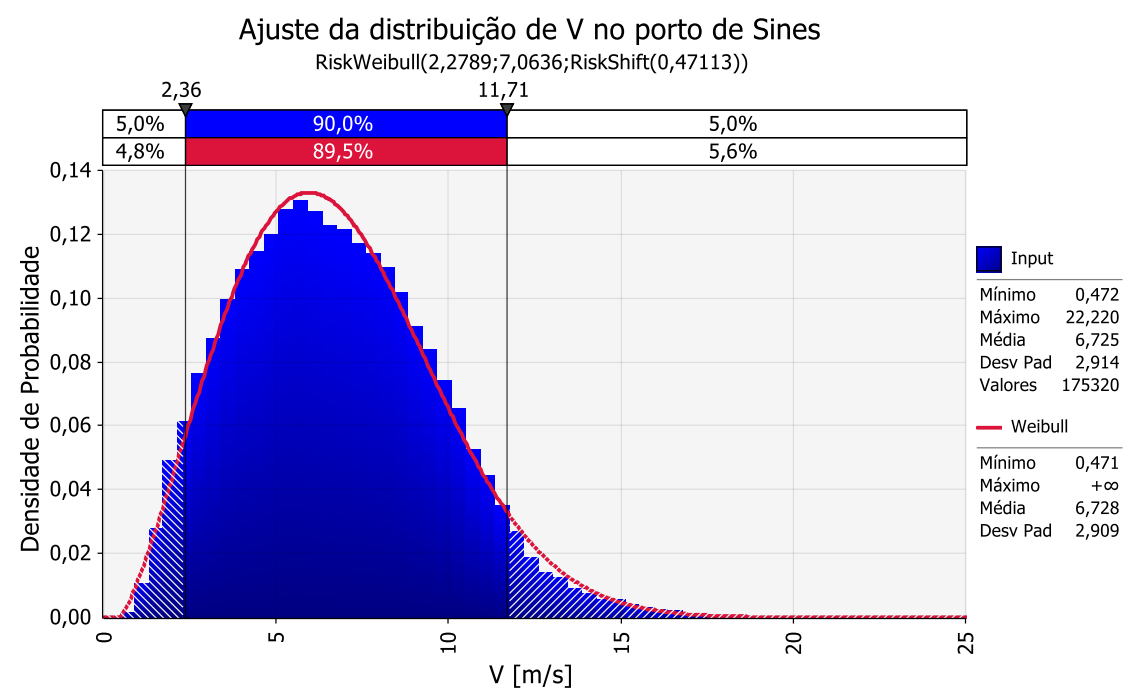


Figura A.1 – Ajuste da distribuição de V no porto de Sines

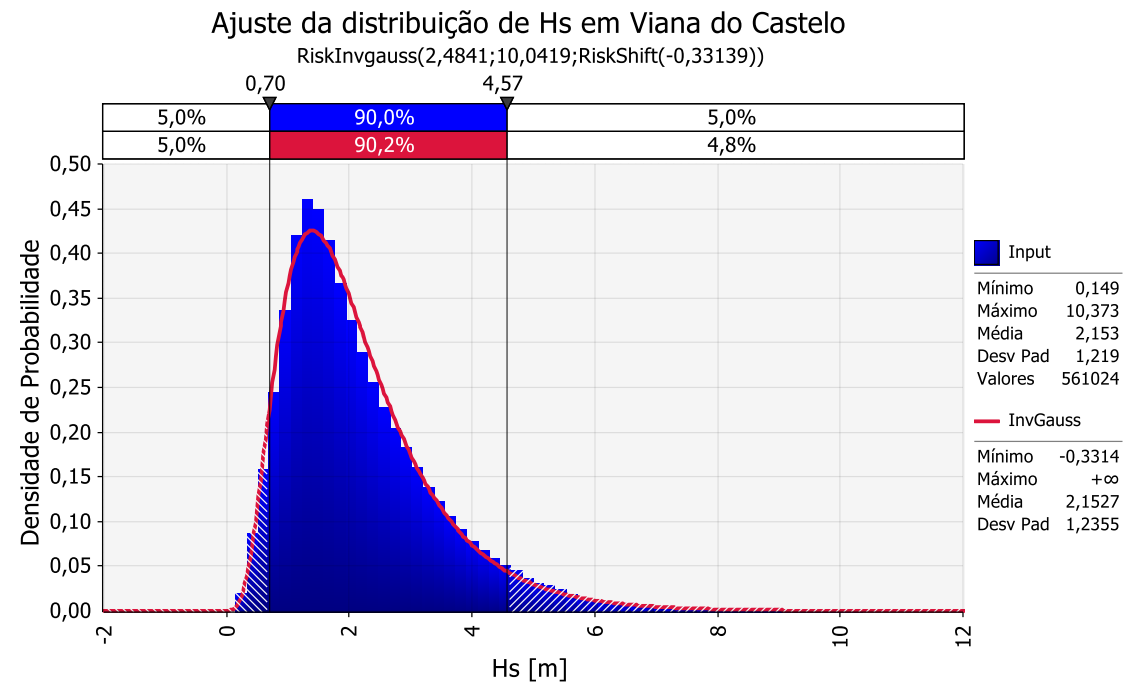


Figura A.2 – Ajuste da distribuição de  $H_s$  em Viana do Castelo

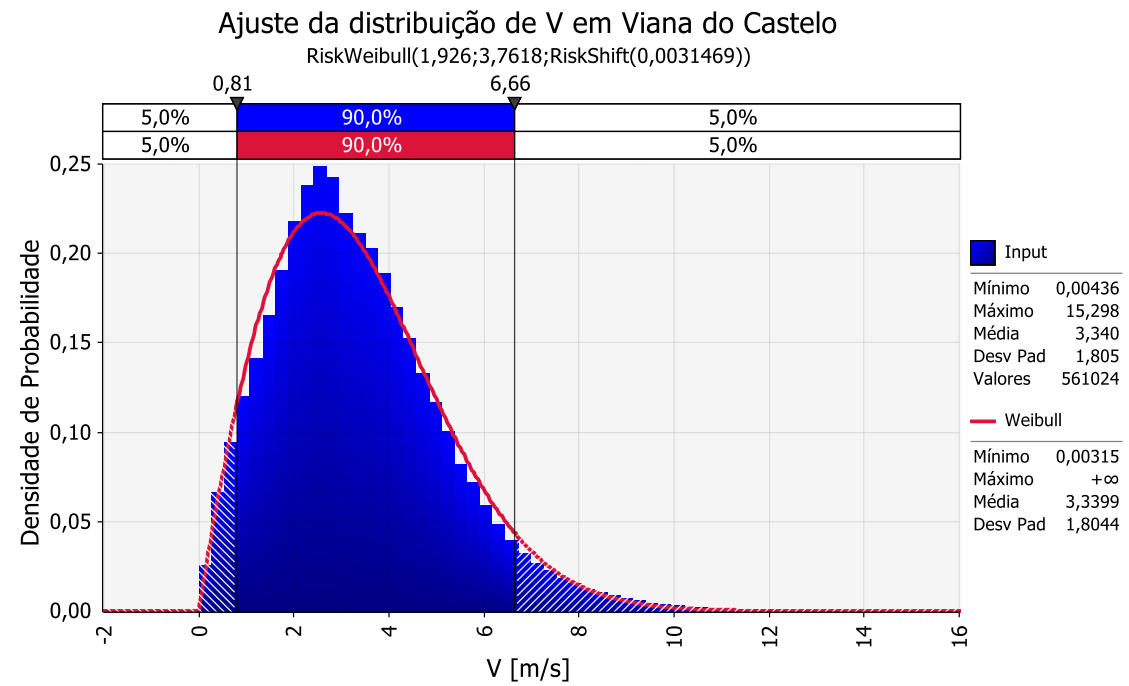


Figura A.3 – Ajuste da distribuição de  $V$  em Viana do Castelo

## Anexo B – Modelo de Projeto

ID	Task Mode	Task Name	Duration	Start	Finish	Predecessors	Weather Window	Hs [m]	V [m/s]	18 May	17 Jul	25 Sep	04 Dec	12 Feb	23 Apr	02 Jul	10 Sep
0		<b>WFA - FASE PRÉ-COMERCIAL</b>	<b>6837 hrs</b>	<b>25/07/17 08:00</b>	<b>06/05/18 05:00</b>												
1		<b>1 MONTAGEM DOS AEROGERADORES</b>	<b>6360 hrs</b>	<b>25/07/17 08:00</b>	<b>16/04/18 08:00</b>												
2		<b>1.1 Fase Preliminar</b>	<b>348 hrs</b>	<b>15/03/18 22:00</b>	<b>30/03/18 10:00</b>												
3		1.1.1 Mobilização da grua	24 hrs	15/03/18 22:00	17/03/18 10:00		N/A	N/A	N/A								
4		1.1.2 Montagem da grua	84 hrs	17/03/18 22:00	24/03/18 10:00	3	N/A	N/A	N/A								
5		1.1.3 Descarregamento das torres	24 hrs	24/03/18 22:00	26/03/18 10:00	4	N/A	N/A	N/A								
6		1.1.4 Descarregamento das nacelles	24 hrs	26/03/18 22:00	28/03/18 10:00	5	N/A	N/A	N/A								
7		1.1.5 Descarregamento das pás	24 hrs	28/03/18 22:00	30/03/18 10:00	6	N/A	N/A	N/A								
8		<b>1.2 Montagem do Aerogerador do WFA 1</b>	<b>6062 hrs</b>	<b>25/07/17 08:00</b>	<b>03/04/18 22:00</b>												
9		1.2.1 Chegada da plataforma WFA 1 ao porto de Sines	0 hrs	25/07/17 08:00	25/07/17 08:00		N/A	N/A	N/A								
10		1.2.2 Montagem da secção 1 da torre do aerogerador 1	6 hrs	30/03/18 22:00	31/03/18 04:00	7FS+12 hrs	4 hrs	N/A	9,8								
11		1.2.3 Montagem da secção 2 da torre do aerogerador 1	6 hrs	31/03/18 04:00	31/03/18 10:00	10	4 hrs	N/A	9,8								
12		1.2.4 Montagem da secção 3 da torre do aerogerador 1	6 hrs	31/03/18 22:00	01/04/18 04:00	11FS+12 hrs	4 hrs	N/A	9,8								
13		1.2.5 Montagem da nacelle do aerogerador 1	12 hrs	01/04/18 16:00	02/04/18 04:00	12FS+12 hrs	12 hrs	N/A	9,8								
14		1.2.6 Montagem da pá 1 do aerogerador 1	6 hrs	02/04/18 16:00	02/04/18 22:00	13FS+12 hrs	6 hrs	N/A	6								
15		1.2.7 Montagem da pá 2 do aerogerador 1	6 hrs	02/04/18 22:00	03/04/18 04:00	14	6 hrs	N/A	6								
16		1.2.8 Montagem da pá 3 do aerogerador 1	6 hrs	03/04/18 16:00	03/04/18 22:00	15FS+12 hrs	6 hrs	N/A	6								
17		<b>1.3 Montagem do Aerogerador do WFA 2</b>	<b>2623 hrs</b>	<b>20/12/17 08:00</b>	<b>08/04/18 15:00</b>												
18		1.3.1 Chegada da plataforma WFA 2 ao porto de Sines	0 hrs	20/12/17 08:00	20/12/17 08:00	9	N/A	N/A	N/A								
19		1.3.2 Deslocação da grua para o cais 2	5 hrs	03/04/18 22:00	04/04/18 03:00	16	N/A	N/A	N/A								
20		1.3.3 Montagem da secção 1 da torre do aerogerador 2	6 hrs	04/04/18 15:00	04/04/18 21:00	19FS+12 hrs	4 hrs	N/A	9,8								
21		1.3.4 Montagem da secção 2 da torre do aerogerador 2	6 hrs	04/04/18 21:00	05/04/18 03:00	20	4 hrs	N/A	9,8								
22		1.3.5 Montagem da secção 3 da torre do aerogerador 2	6 hrs	05/04/18 15:00	05/04/18 21:00	21FS+12 hrs	4 hrs	N/A	9,8								
23		1.3.6 Montagem da nacelle do aerogerador 2	12 hrs	06/04/18 09:00	06/04/18 21:00	22FS+12 hrs	12 hrs	N/A	9,8								
24		1.3.7 Montagem da pá 1 do aerogerador 2	6 hrs	07/04/18 09:00	07/04/18 15:00	23FS+12 hrs	6 hrs	N/A	6								
25		1.3.8 Montagem da pá 2 do aerogerador 2	6 hrs	07/04/18 15:00	07/04/18 21:00	24	6 hrs	N/A	6								
26		1.3.9 Montagem da pá 3 do aerogerador 2	6 hrs	08/04/18 09:00	08/04/18 15:00	25FS+12 hrs	6 hrs	N/A	6								
27		<b>1.4 Montagem do Aerogerador do WFA 3</b>	<b>113 hrs</b>	<b>08/04/18 15:00</b>	<b>13/04/18 08:00</b>												
28		1.4.1 Chegada da plataforma WFA 3 ao porto de Sines	0 hrs	09/04/18 08:00	09/04/18 08:00		N/A	N/A	N/A								
29		1.4.2 Deslocação da grua para o cais 3	5 hrs	08/04/18 15:00	08/04/18 20:00	26	N/A	N/A	N/A								
30		1.4.3 Montagem da secção 1 da torre do aerogerador 3	6 hrs	09/04/18 08:00	09/04/18 14:00	28;29FS+12 hrs	4 hrs	N/A	9,8								
31		1.4.4 Montagem da secção 2 da torre do aerogerador 3	6 hrs	09/04/18 14:00	09/04/18 20:00	30	4 hrs	N/A	9,8								
32		1.4.5 Montagem da secção 3 da torre do aerogerador 3	6 hrs	10/04/18 08:00	10/04/18 14:00	31FS+12 hrs	4 hrs	N/A	9,8								
33		1.4.6 Montagem da nacelle do aerogerador 3	12 hrs	11/04/18 02:00	11/04/18 14:00	32FS+12 hrs	12 hrs	N/A	9,8								
34		1.4.7 Montagem da pá 1 do aerogerador 3	6 hrs	12/04/18 02:00	12/04/18 08:00	33FS+12 hrs	6 hrs	N/A	6								
35		1.4.8 Montagem da pá 2 do aerogerador 3	6 hrs	12/04/18 08:00	12/04/18 14:00	34	6 hrs	N/A	6								
36		1.4.9 Montagem da pá 3 do aerogerador 3	6 hrs	13/04/18 02:00	13/04/18 08:00	35FS+12 hrs	6 hrs	N/A	6								
37		1.5 Descomissionamento da grua	36 hrs	13/04/18 20:00	16/04/18 08:00	36	N/A	N/A	N/A								
38		<b>2 INSTALAÇÃO OFFSHORE</b>	<b>1048 hrs</b>	<b>23/03/18 13:00</b>	<b>06/05/18 05:00</b>												
39		2.1 Mobilização do navio 1	48 hrs	23/03/18 13:00	25/03/18 13:00		N/A	N/A	N/A								
40		<b>2.2 Instalação do Trio de Âncoras 1</b>	<b>100 hrs</b>	<b>25/03/18 13:00</b>	<b>29/03/18 17:00</b>												
41		2.2.1 Carregamento nº 1 de 3 âncoras, 3 bóias e correntes diversas	72 hrs	25/03/18 13:00	28/03/18 13:00	39	N/A	N/A	N/A								
42		2.2.2 Saída nº 1 para o local de instalação	2 hrs	28/03/18 13:00	28/03/18 15:00	41	2+6 hrs	4	30								
43		2.2.3 Instalação da âncora 1	6 hrs	28/03/18 15:00	28/03/18 21:00	42	6 hrs	3	30								
44		2.2.4 Sondagem da âncora 1 por ROV	2 hrs	28/03/18 21:00	28/03/18 23:00	43	2 hrs	2	16								
45		2.2.5 Instalação da âncora 2	6 hrs	28/03/18 23:00	29/03/18 05:00	44	6 hrs	3	30								
46		2.2.6 Sondagem da âncora 2 por ROV	2 hrs	29/03/18 05:00	29/03/18 07:00	45	2 hrs	2	16								
47		2.2.7 Instalação da âncora 3	6 hrs	29/03/18 07:00	29/03/18 13:00	46	6 hrs	3	30								
48		2.2.8 Sondagem da âncora 3 por ROV	2 hrs	29/03/18 13:00	29/03/18 15:00	47	2 hrs	2	16								
49		2.2.9 Regresso nº 1 ao porto de Viana do Castelo	2 hrs	29/03/18 15:00	29/03/18 17:00	48	2 hrs	4	30								





ID	Task Mode	Task Name	Duration	Start	Finish	Predecessors	Weather Window	Hs [m]	V [m/s]	18 May	17 Jul	25 Sep	04 Dec	12 Feb	23 Apr	02 Jul	10 Sep		
										S	W	S	T	M	F	T	S	W	S
50		2.3 Instalação do Trio de Âncoras 2	100 hrs	29/03/18 17:00	02/04/18 21:00														
51		2.3.1 Carregamento nº 2 de 3 âncoras, 3 bóias e correntes diversas	72 hrs	29/03/18 17:00	01/04/18 17:00	49	N/A	N/A	N/A										
52		2.3.2 Saída nº 2 para o local de instalação	2 hrs	01/04/18 17:00	01/04/18 19:00	51	2+6 hrs	4	30										
53		2.3.3 Instalação da âncora 4	6 hrs	01/04/18 19:00	02/04/18 01:00	52	6 hrs	3	30										
54		2.3.4 Sondagem da âncora 4 por ROV	2 hrs	02/04/18 01:00	02/04/18 03:00	53	2 hrs	2	16										
55		2.3.5 Instalação da âncora 5	6 hrs	02/04/18 03:00	02/04/18 09:00	54	6 hrs	3	30										
56		2.3.6 Sondagem da âncora 5 por ROV	2 hrs	02/04/18 09:00	02/04/18 11:00	55	2 hrs	2	16										
57		2.3.7 Instalação da âncora 6	6 hrs	02/04/18 11:00	02/04/18 17:00	56	6 hrs	3	30										
58		2.3.8 Sondagem da âncora 6 por ROV	2 hrs	02/04/18 17:00	02/04/18 19:00	57	2 hrs	2	16										
59		2.3.9 Regresso nº 2 ao porto de Viana do Castelo	2 hrs	02/04/18 19:00	02/04/18 21:00	58	2 hrs	4	30										
60		2.4 Instalação do Trio de Âncoras 3	100 hrs	02/04/18 21:00	07/04/18 01:00														
61		2.4.1 Carregamento nº 3 de 3 âncoras, 3 bóias e correntes diversas	72 hrs	02/04/18 21:00	05/04/18 21:00	59	N/A	N/A	N/A										
62		2.4.2 Saída nº 3 para o local de instalação	2 hrs	05/04/18 21:00	05/04/18 23:00	61	2+6 hrs	4	30										
63		2.4.3 Instalação da âncora 7	6 hrs	05/04/18 23:00	06/04/18 05:00	62	6 hrs	3	30										
64		2.4.4 Sondagem da âncora 7 por ROV	2 hrs	06/04/18 05:00	06/04/18 07:00	63	2 hrs	2	16										
65		2.4.5 Instalação da âncora 8	6 hrs	06/04/18 07:00	06/04/18 13:00	64	6 hrs	3	30										
66		2.4.6 Sondagem da âncora 8 por ROV	2 hrs	06/04/18 13:00	06/04/18 15:00	65	2 hrs	2	16										
67		2.4.7 Instalação da âncora 9	6 hrs	06/04/18 15:00	06/04/18 21:00	66	6 hrs	3	30										
68		2.4.8 Sondagem da âncora 9 por ROV	2 hrs	06/04/18 21:00	06/04/18 23:00	67	2 hrs	2	16										
69		2.4.9 Regresso nº 3 ao porto de Viana do Castelo	2 hrs	06/04/18 23:00	07/04/18 01:00	68	2 hrs	4	30										
70		2.5 Instalação do Trio de Linhas de Amarração 1	87 hrs	07/04/18 01:00	10/04/18 16:00														
71		2.5.1 Carregamento nº 4 de 3 cabos e correntes diversas	36 hrs	07/04/18 01:00	08/04/18 13:00	69	N/A	N/A	N/A										
72		2.5.2 Saída nº 4 para o local de instalação	2 hrs	08/04/18 13:00	08/04/18 15:00	71	2+30 hrs	4	30										
73		2.5.3 Instalação do trio de linhas de amarração 1	30 hrs	08/04/18 15:00	09/04/18 21:00	72	30 hrs	2	30										
74		2.5.4 Sondagem do trio de linhas de amarração 1 por ROV	17 hrs	09/04/18 21:00	10/04/18 14:00	73	17 hrs	2	16										
75		2.5.5 Regresso nº 4 ao porto de Viana do Castelo	2 hrs	10/04/18 14:00	10/04/18 16:00	74	2 hrs	4	30										
76		2.6 Instalação do Trio de Linhas de Amarração 2	87 hrs	10/04/18 16:00	14/04/18 07:00														
77		2.6.1 Carregamento nº 5 de 3 cabos e correntes diversas	36 hrs	10/04/18 16:00	12/04/18 04:00	75	N/A	N/A	N/A										
78		2.6.2 Saída nº 5 para o local de instalação	2 hrs	12/04/18 04:00	12/04/18 06:00	77	2+30 hrs	4	30										
79		2.6.3 Instalação do trio de linhas de amarração 2	30 hrs	12/04/18 06:00	13/04/18 12:00	78	30 hrs	2	30										
80		2.6.4 Sondagem do trio de linhas de amarração 2 por ROV	17 hrs	13/04/18 12:00	14/04/18 05:00	79	17 hrs	2	16										
81		2.6.5 Regresso nº 5 ao porto de Viana do Castelo	2 hrs	14/04/18 05:00	14/04/18 07:00	80	2 hrs	4	30										
82		2.7 Instalação do Trio de Linhas de Amarração 3	87 hrs	14/04/18 07:00	17/04/18 22:00														
83		2.7.1 Carregamento nº 6 de 3 cabos e correntes diversas	36 hrs	14/04/18 07:00	15/04/18 19:00	81	N/A	N/A	N/A										
84		2.7.2 Saída nº 6 para o local de instalação	2 hrs	15/04/18 19:00	15/04/18 21:00	83	2+30 hrs	4	30										
85		2.7.3 Instalação do trio de linhas de amarração 3	30 hrs	15/04/18 21:00	17/04/18 03:00	84	30 hrs	2	30										
86		2.7.4 Sondagem do trio de linhas de amarração 3 por ROV	17 hrs	17/04/18 03:00	17/04/18 20:00	85	17 hrs	2	16										
87		2.7.5 Regresso nº 6 ao porto de Viana do Castelo	2 hrs	17/04/18 20:00	17/04/18 22:00	86	2 hrs	4	30										
88		2.8 Desmobilização do navio 1	24 hrs	17/04/18 22:00	18/04/18 22:00	87	N/A	N/A	N/A										
89		2.9 Mobilização do navio 2	48 hrs	08/04/18 14:00	10/04/18 14:00	93FS-50 hrs	N/A	N/A	N/A										
90		2.10 Instalação do WFA 1	259 hrs	03/04/18 22:00	14/04/18 17:00														
91		2.10.1 Reboque e Instalação do WFA 1	235 hrs	03/04/18 22:00	13/04/18 17:00														
92		2.10.1.1 Preparação do WFA 1 e saída do porto de Sines	18 hrs	03/04/18 22:00	04/04/18 16:00	16	N/A	N/A	N/A										
93		2.10.1.2 Reboque do WFA 1 para o local de instalação	144 hrs	04/04/18 16:00	10/04/18 16:00	92	144+25 hrs	4	15										
94		2.10.1.3 Saída nº 7 para o local de instalação	2 hrs	10/04/18 14:00	10/04/18 16:00	89;93FS-2 hrs	2 hrs	4	30										
95		2.10.1.4 Hook-up do WFA 1	25 hrs	10/04/18 16:00	11/04/18 17:00	75;94	25 hrs	2	15										
96		2.10.1.5 Regresso nº 1 ao porto de Sines	48 hrs	11/04/18 17:00	13/04/18 17:00	95	48 hrs	4	30										
97		2.10.1.6 Conclusão da sondagem do trio de linhas de amarração 1 por ROV	12 hrs	11/04/18 17:00	12/04/18 05:00	95	12 hrs	2	15										
98		2.10.1.7 Regresso nº 7 ao porto de Viana do Castelo	2 hrs	12/04/18 05:00	12/04/18 07:00	97	2 hrs	4	30										
99		2.10.2 Instalação do Cabo Elétrico 1	58 hrs	12/04/18 07:00	14/04/18 17:00														





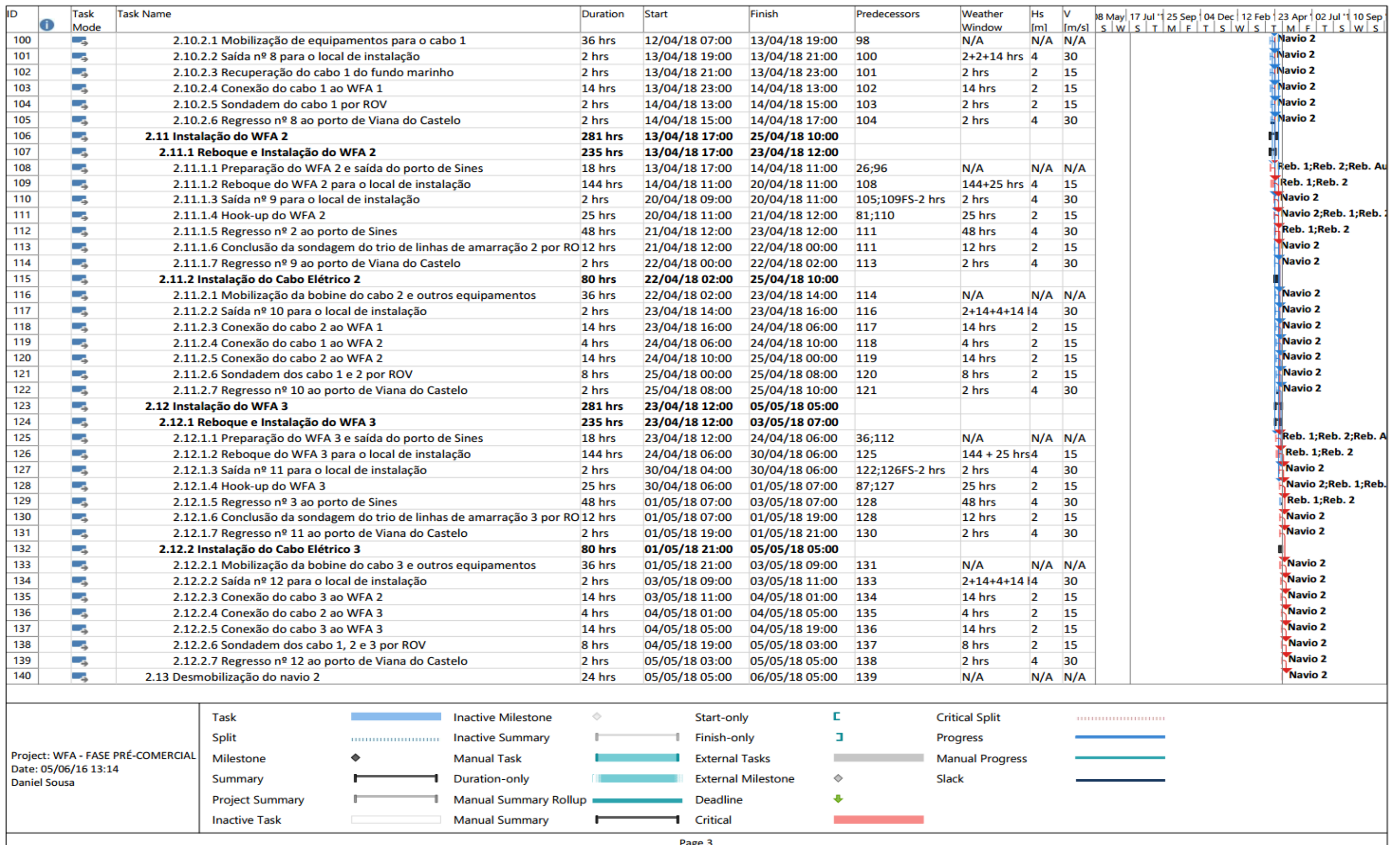


Figura A.4 – Modelo de projeto



Anexo C – Outputs do Plano Base

Tabela A.1 – Datas de fim, durações e WDT expectáveis para os sumários de atividades do projeto WFA (segundo o plano base)

	Data								Duração [dias]								WDT [dias]							
Sumário de Atividades	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	P10	P50	P75	P90	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	P10	P50	P75	P90	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	P10	P50	P75	P90
Montagem do Aerogerador do WFA 1	03/04/18	20/04/18	06/04/18	2,9	03/04/18	06/04/18	08/04/18	11/04/18	4,0	20,8	7,0	2,9	4,0	6,1	8,4	11,2	0,0	16,8	3,0	2,9	0,0	2,1	4,4	7,2
Montagem do Aerogerador do WFA 2	08/04/18	03/05/18	14/04/18	4,3	09/04/18	13/04/18	16/04/18	20/04/18	4,7	20,8	7,5	3,0	4,8	6,7	8,5	11,8	0,0	16,1	2,8	3,0	0,1	2,0	3,8	7,1
Montagem do Aerogerador do WFA 3	13/04/18	10/05/18	22/04/18	5,4	16/04/18	20/04/18	24/04/18	29/04/18	4,7	20,8	7,6	2,9	4,9	6,9	8,6	11,1	0,0	16,1	2,9	2,9	0,2	2,2	3,9	6,4
Instalação do Trio de Âncoras 1	29/03/18	28/04/18	03/04/18	5,4	29/03/18	31/03/18	05/04/18	11/04/18	4,2	33,6	8,5	5,4	4,2	6,4	11,0	16,5	0,0	29,4	4,4	5,4	0,0	2,3	6,9	12,4
Instalação do Trio de Âncoras 2	02/04/18	09/05/18	09/04/18	6,9	02/04/18	08/04/18	14/04/18	19/04/18	4,2	27,1	6,9	4,5	4,2	4,3	7,7	15,0	0,0	22,9	2,7	4,5	0,0	0,1	3,5	10,9
Instalação do Trio de Âncoras 3	07/04/18	13/05/18	16/04/18	7,6	07/04/18	14/04/18	21/04/18	27/04/18	4,2	21,8	6,4	3,7	4,2	4,4	7,3	12,5	0,0	17,6	2,2	3,7	0,0	0,2	3,1	8,4
Instalação do Trio de Linhas de Amarração 1	10/04/18	20/05/18	23/04/18	8,7	12/04/18	22/04/18	29/04/18	05/05/18	3,6	40,2	7,1	5,0	3,6	4,7	9,5	13,5	0,0	36,5	3,5	5,0	0,0	1,0	5,8	9,9
Instalação do Trio de Linhas de Amarração 2	14/04/18	01/06/18	30/04/18	9,8	17/04/18	29/04/18	06/05/18	14/05/18	3,6	38,6	6,7	4,8	3,6	4,5	7,7	13,6	0,0	35,0	3,0	4,8	0,0	0,8	4,1	10,0
Instalação do Trio de Linhas de Amarração 3	17/04/18	11/06/18	06/05/18	10,7	22/04/18	05/05/18	13/05/18	21/05/18	3,6	38,9	6,2	4,2	3,6	3,9	6,8	12,0	0,0	35,3	2,5	4,2	0,0	0,3	3,2	8,4
Reboque e Instalação do WFA 1	12/04/18	31/05/18	28/04/18	9,8	16/04/18	27/04/18	03/05/18	11/05/18	8,4	50,8	11,0	5,3	8,4	8,4	11,6	17,4	0,0	42,5	2,6	5,3	0,0	0,0	3,2	9,0
Instalação do Cabo Elétrico 1	14/04/18	07/06/18	02/05/18	10,2	19/04/18	01/05/18	08/05/18	16/05/18	2,4	20,6	4,0	2,8	2,4	2,4	4,4	8,0	0,0	18,2	1,6	2,8	0,0	0,0	2,0	5,6
Reboque e Instalação do WFA 2	22/04/18	13/06/18	10/05/18	10,2	28/04/18	09/05/18	17/05/18	25/05/18	8,4	45,2	11,0	4,1	8,4	8,6	11,9	16,3	0,0	36,8	2,6	4,1	0,0	0,3	3,5	8,0
Instalação do Cabo Elétrico 2	25/04/18	19/06/18	16/05/18	10,5	03/05/18	15/05/18	22/05/18	30/05/18	3,3	31,5	5,4	3,6	3,3	3,3	6,3	10,3	0,0	28,1	2,0	3,6	0,0	0,0	2,9	6,9
Reboque e Instalação do WFA 3	01/05/18	30/06/18	23/05/18	10,6	10/05/18	22/05/18	30/05/18	07/06/18	8,4	29,3	10,7	3,7	8,4	8,9	11,9	16,4	0,0	21,0	2,3	3,7	0,0	0,5	3,5	8,0
Instalação do Cabo Elétrico 3	05/05/18	03/07/18	28/05/18	10,7	15/05/18	27/05/18	04/06/18	12/06/18	3,3	18,4	5,0	3,1	3,3	3,3	5,5	9,3	0,0	15,0	1,6	3,1	0,0	0,0	2,2	6,0



Anexo D – *Outputs* do Plano Otimizado

Tabela A.2 – Datas de fim, durações e WDT expectáveis para os sumários de atividades do projeto WFA (segundo o plano otimizado)

	Data								Duração [dias]								WDT [dias]							
Sumário de Atividades	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	P10	P50	P75	P90	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	P10	P50	P75	P90	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	P10	P50	P75	P90
Montagem do Aerogerador do WFA 1	26/05/18	17/06/18	30/05/18	4,7	26/05/18	28/05/18	02/06/18	06/06/18	4,0	26,1	8,4	4,7	4,0	5,7	11,6	15,2	0,0	11,1	1,2	1,6	0,0	0,8	1,6	2,8
Montagem do Aerogerador do WFA 2	29/05/18	13/06/18	02/06/18	2,7	30/05/18	02/06/18	04/06/18	06/06/18	4,7	16,8	7,2	2,5	4,7	6,4	8,8	10,8	0,0	12,1	2,5	2,5	0,0	1,7	4,1	6,1
Montagem do Aerogerador do WFA 3	04/06/18	26/06/18	11/06/18	4,1	06/06/18	10/06/18	13/06/18	16/06/18	4,7	18,1	7,2	2,8	4,7	6,3	8,7	11,2	0,0	13,4	2,5	2,8	0,0	1,5	4,0	6,5
Instalação do Trio de Âncoras 1	13/06/18	18/06/18	13/06/18	0,7	13/06/18	13/06/18	13/06/18	14/06/18	4,2	9,5	4,4	0,7	4,2	4,2	4,2	5,3	0,0	5,3	0,3	0,7	0,0	0,0	0,0	1,1
Instalação do Trio de Âncoras 2	17/06/18	23/06/18	18/06/18	0,9	17/06/18	17/06/18	18/06/18	19/06/18	4,2	8,5	4,4	0,6	4,2	4,2	4,2	4,8	0,0	4,3	0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,7
Instalação do Trio de Âncoras 3	21/06/18	30/06/18	22/06/18	1,1	21/06/18	21/06/18	22/06/18	24/06/18	4,2	10,5	4,4	0,6	4,2	4,2	4,2	4,8	0,0	6,4	0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,6
Instalação do Trio de Linhas de Amarração 1	25/06/18	07/07/18	26/06/18	1,9	25/06/18	26/06/18	27/06/18	29/06/18	3,6	15,3	4,3	1,4	3,6	3,6	4,5	6,2	0,0	11,7	0,7	1,4	0,0	0,0	0,8	2,6
Instalação do Trio de Linhas de Amarração 2	29/06/18	10/07/18	30/06/18	2,2	29/06/18	30/06/18	01/07/18	04/07/18	3,6	15,3	4,1	1,2	3,6	3,6	4,0	5,5	0,0	11,7	0,5	1,2	0,0	0,0	0,4	1,9
Instalação do Trio de Linhas de Amarração 3	02/07/18	15/07/18	05/07/18	2,4	02/07/18	04/07/18	06/07/18	08/07/18	3,6	12,3	4,1	1,1	3,6	3,6	3,7	5,5	0,0	8,6	0,5	1,1	0,0	0,0	0,0	1,9
Reboque e Instalação do WFA 1	27/06/18	13/07/18	28/06/18	2,3	27/06/18	28/06/18	29/06/18	01/07/18	8,4	22,5	8,8	1,2	8,4	8,4	8,4	10,2	0,0	14,1	0,4	1,2	0,0	0,0	0,0	1,8
Instalação do Cabo Elétrico 1	29/06/18	16/07/18	01/07/18	2,3	29/06/18	30/06/18	02/07/18	04/07/18	2,4	12,8	2,6	0,6	2,4	2,4	2,4	3,2	0,0	10,3	0,2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,8
Reboque e Instalação do WFA 2	06/07/18	23/07/18	09/07/18	2,4	06/07/18	08/07/18	10/07/18	12/07/18	8,4	17,3	8,9	1,1	8,4	8,4	8,7	10,2	0,0	8,9	0,5	1,1	0,0	0,0	0,3	1,8
Instalação do Cabo Elétrico 2	10/07/18	28/07/18	12/07/18	2,6	10/07/18	12/07/18	14/07/18	16/07/18	3,3	9,6	3,7	0,9	3,3	3,3	3,5	5,0	0,0	6,3	0,4	0,9	0,0	0,0	0,1	1,6
Reboque e Instalação do WFA 3	16/07/18	02/08/18	19/07/18	2,5	16/07/18	18/07/18	20/07/18	22/07/18	8,4	17,4	8,7	0,9	8,4	8,4	8,4	9,5	0,0	9,0	0,3	0,9	0,0	0,0	0,0	1,1
Instalação do Cabo Elétrico 3	20/07/18	05/08/18	22/07/18	2,6	20/07/18	22/07/18	24/07/18	26/07/18	3,3	8,4	3,6	0,8	3,3	3,3	3,3	4,8	0,0	5,1	0,3	0,8	0,0	0,0	0,0	1,4